دانشگاه تبریز
دانشکده کشاورزی
گروه مهندسی آب

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته آبیاری و زهکشی

عنوان

روندیابی هیدرولیکی سیلاب به روش موج دینامیک و مقایسه با روشهای ماسکینگام خطی و غیرخطی

استاد راهنما

دکتر احمد فاخری فرد

استاد مشاور

دکتر امیر حسین ناظمی

پژوهشگر

ابوالفتح اولادغفاری

اسفند 1387 شماره پایان‌نامه: 11-1387

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به پدر عزیز و مادر مهربانم.

سپاس پروردگار یکتا را که نعمت هستی را به بشر ارزانی داشت و قدرت تفکر و اندیشیدن برای پی بردن به اسرار و شگفتی های خلقت و ناشناخته ها را به او اعطا فرمود. اینک که به لطف و عنایت خداوند متعال انجام این تحقیق به پایان رسیده، بر خود واجب می دانم از راهنمایی ها و مساعدت های عزیزان و سرورانی که بی شک بدون نظر لطف و کمک های بی دریغشان انجام این تحقیق میسر نبود، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر فاخری فرد که با بردباری و دقت زائد الوصف در طول اجرا و تدوین پایان نامه راهنمایی های ارزنده ای را ارائه نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر ناظمی که مشاوره پایان نامه را بر عهده داشتند و در اجرای آن از نظرات ارزنده و راهگشای ایشان بهره مند بودم، کمال قدردانی و سپاس را دارم.

از استاد محترم جناب آقای دکتر قربانی به خاطر تقبل زحمت داوری و باز خوانی متن پایان نامه صمیمانه تشکر و قدردانی می کنم.

از مدیر محترم گروه مهندسی آب جناب آقای دکتر فرسادی زاده و مدیر گروه سابق جناب آقای دکتر صدرالدینی که با مساعدت های خویش من را در مراحل آماده سازی و دفاع از پایان نامه یاری نمودند، کمال تشکر را دارم.

از سایر اساتید و اعضای محترم گروه مهندسی آب که در امر پیشرفت و تحصیل اینجانب زحمات زیادی را متحمل شده اند، تشکر می نمایم.

از دوستان عزیزم که اینجانب را در اجرای این تحقیق یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

از خانواده عزیزم که دامان پر مهرشان مایه آرامش، دلگرمی و تلاشم بوده است کمال تشکر را دارم.

نام خانوادگی دانشجو: اولادغفاری **نام**: ابوالفتح

عنوان پایان‌نامه:

روندیابی هیدرولیکی سیلاب به روش موج دینامیک و مقایسه با روشهای ماسکینگام خطی و غیرخطی

استاد راهنما: دکتر احمد فاخری فرد

استاد مشاور: دکتر امیر حسین ناظمی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: مهندسی آب **گرایش**: آبیاری و زهکشی **دانشگاه**: تبریز **دانشکده**: کشاورزی **تاریخ فارغ التحصیلی**: 87/12/18 **تعداد صفحه**:98

کلید واژه‌ها: روندیابی هیدرولیکی، روندیابی هیدرولوژیکی، موج دینامیک، مدل ماسکینگام

چکیده:

روندیابی سیل حل حالتی از جریان غیرماندگار در یک رودخانه می‌باشد که اهمیت کاربردی زیادی در مهندسی رودخانه، کنترل و کاهش خطرات سیل، حفاظت رودخانه، سیستم‌های هشدار سیل، مدل‌سازی جریان در مخازن و سرریزها و . . . دارد. یکی از معضلات کشور در زمینه مطالعات روندیابی سیلاب، عدم دسترسی به آمار و اطلاعات کامل در مورد رودخانه‌ها و تعداد محدود ایستگاه‌های هیدرومتری است که استفاده از روشهای نیازمند آمار کامل و دقیق را با مشکلاتی مواجه می‌سازد. حل مسئله روندیابی سیلاب بسته به شرایط و اطلاعات موجود از رودخانه می‌تواند به روشهای مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام پذیرد. تفاوت اصلی این دو در عدم نیاز روشهای هیدرولیکی به داده‌های هیدروگراف سالهای قبل می‌باشد که این داده‌ها صرفاً برای صحت سنجی بکاربرده می‌شوند نه ساخت مدل. در تحقیق حاضر برای روندیابی هیدرولیکی از روش تفاضلات محدود ۴ نقطه‌ای ماسکینگام استفاده شده است که بر مبنای حل معادله موج دینامیک سنت- ونانت می‌باشد. همچنین در روندیابی هیدرولوژیکی روش ماسکینگام با مدل‌های خطی و غیرخطی بکار گرفته شده است. برای تخمین پارامترها در مدل‌های ماسکینگام، روش سعی و خطا برپایه کمترین مربعات خطاها پیشنهاد شده و جهت بررسی این روش و مقایسه با سایر روشهای ارائه شده برای تخمین پارامترها از داده‌های ویلسون (۱۹۷۴) استفاده شده است.

جهت بررسی و روندیابی سیلاب بازه‌ای از مسیر مهران‌رود از ایستگاه هیدرومتری لیقوان تا هروی انتخاب گردید. در روندیابی هیدرولیکی هیدروگراف خروجی در ایستگاه هروی برای سه سیل مشاهداتی با استفاده از مشخصات هیدروگراف ورودی ایستگاه لیقوان و مشخصات هیدرولیکی مسیر حاصل گردید. در روندیابی هیدرولوژیکی، هیدروگراف‌های خروجی با استفاده از هیدورگراف ورودی و خروجی مشاهداتی مربوط به یکی از همان سه سیل مشاهداتی بدست آمد. با مقایسه نتایج بدست آمده و هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی مشخص شد که روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک (روش تفاضلات محدود ۴ نقطه‌ای ماسکینگام) از تطابق بهتر و دقیق‌تری نسبت به روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام برخوردار است. همچنین مطالعه اثرات شیب بستر رودخانه بر روی روندیابی به روش موج دینامیک نشان داد که در شیب‌های زیاد استفاده از مشخصات هیدرولیکی بصورت میانگین تأثیر قابل توجهی در نتایج نشان نمی‌دهد ولی در شیب‌های کم نتایج بشدت تحت تأثیر مقاطع طولی و دقت مشخصات هیدرولیکی می‌باشد.

فهرست مطالب

فصل اول/ کلیات ٤

۱-۱ مقدمه ٥

۱-۲ اهداف تحقیق ٦

فصل دوم/ بررسی منابع ۷

۲-۱ روندیابی هیدرولیکی ۸

۲-۱-۱ روندیابی سینماتیکی ۱۰

۲-۱-۲ روندیابی پخشیدگی ۱٤

۲-۱-۳ روندیابی به روش همانندی پخش ۱٦

۲-۱-۴ روندیابی دینامیکی ۱۸

۲-۱-۴-۱ روش تفاضلات محدود ۱۸

۲-۱-۴-۲ روش اجزاء محدود ۲٥

۲-۱-۴-۳ روش خصوصیات ۲٥

۲-۲ روندیابی هیدرولوژیکی ۲٦

۲-۲-۱ روندیابی ساده ۲٦

۲-۲-۲ روندیابی ذخیره‌ای ۲٦

۲-۲-۲-۱ روندیابی در مخزن ۲۷

۲-۲-۲-۲ روندیابی در رودخانه ۲۸

- روش ماسکینگام ۲۹

- روش مقادیر اجرایی ۳۹

فصل سوم/ مواد و روشها ٤۲

۳-۱ منطقه مورد مطالعه ٤۳

۳-۲ روندیابی هیدرولیکی ٤٥

۳-۳ روندیابی هیدرولوژیکی ٥۱

۳-۴ توابع ارزیابی عملکرد ٥٤

فصل چهارم/ نتایج و بحث ۵۵
۴-۱ نتایج و بحث روندیابی هیدرولیکی ۵۶
۴-۲ بررسی روش تخمین پارامترهای مدل‌های ماسکینگام ۶۲
۴-۳ نتایج و بحث روندیابی هیدرولوژیکی ۶۵
۴-۴ نتیجه‌گیری ۶۸
۴-۵ پیشنهادات ۶۸
فهرست منابع ۶۹
ضمائم ۷۱
الف) کد (**m-file**) نگارش شده برای روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک ۷۲
ب) کد (**m-file**) نگارش شده برای روندیابی هیدرولوژیکی به روش ماسکینگام خطی ۷۵
پ) کد (**m-file**) نگارش شده برای روندیابی هیدرولوژیکی به روش ماسکینگام غیرخطی۱ ..... ۷۷
ت) کد (**m-file**) نگارش شده برای روندیابی هیدرولوژیکی به روش ماسکینگام غیرخطی۲ ..... ۸۲
ث) مقاطع مورد استفاده در روندیابی مسیر مهران‌رود حد فصل ایستگاه هیدرومتری لیقوان تا هروی ۸۷

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقادیر b برای سه نوع کانال ۱۱
جدول ۴-۱- نتایج مقایسه‌های آماری روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک ۵۸
جدول ۴-۲- نتایج مقایسه‌های آماری روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک با مقاطع کمتر ۵۹
جدول ۴-۳- نتایج مقایسه‌های آماری روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک با شیب‌های متفاوت ۶۰
جدول ۴-۴- پارامترهای ماسکینگام تخمین زده شده ۶۳
جدول ۴-۵- مقایسه آماری روشهای تخمین پارامتر ۶۴
جدول ۴-۶- مقادیر پارامترهای تخمین زده شده برای مسیر لیقوان - هروی ۶۵
جدول۴-۷- نتایج آماری روندیابی با مدل‌های ماسکینگام ۶۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱- طبقه‌بندی روشهای عددی برای حل معادلات سنت- ونانت ۹

شکل ۲-۲- انتشار موج سینماتیکی..... ۱۲

شکل ۲-۳- نمایش هندسی تقریب‌های تفاضل محدود..... ۱۹

شکل ۲-۴- شبکه تفاضلات محدود..... ۲۰

شکل ۲-۵- شکل توصیفی روندیابی به روش پالس..... ۲۷

شکل ۲-۶- ذخیره آب در مسیر رودخانه ۲۸

شکل ۲-۷- تغییرات ذخیره در طی جریان ۲۸

شکل ۲-۸- رابطه دبی خروجی و ذخیره..... ۲۹

شکل ۲-۹- روش آزمون و خطا برای محاسبه K وX ۳۱

شکل ۲-۱۰- شمای ذخیره تیغه‌ای و منشوری و دبی اجرایی ٤۰

شکل ۳-۱- مشخصات هیدرولیکی بکاربرده شده در روندیابی..... ٤۳

شکل ۳-۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان‌شرقی و ایستگاه‌های هیدرومتری لیقوان و هروی. ٤٤

شکل ۳-۳- موقعیت مکانی و زمانی دبی جریان در طول کانال ٤۷

شکل ۳-۴- پلان x-t برای درون‌یابی خطی ٤۹

شکل ۳-۵- فلوچارت روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک..... ۵۰

شکل ۳-۶- فلوچارت تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام..... ۵۳

شکل ٤-۱- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک برای سیل تاریخ ۸۲/۱/۱۸ ..... ۵٦

شکل ٤-۲- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک برای سیل تاریخ ۸٤/۳/۱۲ ..... ۵۷

شکل ٤-۳- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک برای سیل تاریخ ۸٦/۲/۱۵ ..... ۵۷

شکل ٤-٤- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک با شیب و مقاطع مختلف برای تاریخ ۸۲/۱/۱۸ ..... ٦۰

شکل ٤-۵- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک با شیب و مقاطع مختلف برای تاریخ ۸٤/۳/۱۲ ..... ٦۱

شکل ٤-٦- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک با شیب و مقاطع مختلف برای تاریخ ۸٦/۲/۱۵ ..... ٦۱

شکل۴-۷- مقایسه هیدروگرافهای خروجی مدل خطی ٦۲

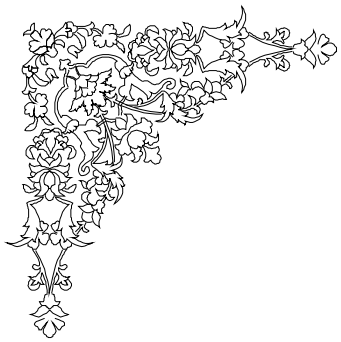
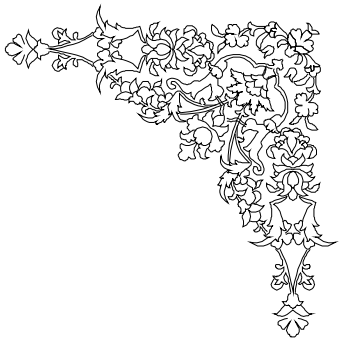
شکل۴-۸- مقایسه هیدروگرافهای خروجی مدل غیرخطی۱ ..... ٦۳

شکل۴-۹- مقایسه هیدروگرافهای خروجی مدل غیرخطی۲ ..... ٦٤

شکل۴-۱۰- روندیابی هیدرولوژیکی به روشهای ماسکینگام خطی و غیرخطی برای سیل تاریخ ۸۲/۱/۱۸..... ٦٦

شکل۴-۱۱- روندیابی هیدرولوژیکی به روشهای ماسکینگام خطی و غیرخطی برای سیل تاریخ ۸۴/۳/۱۲..... ٦٦

شکل۴-۱۲- روندیابی هیدرولوژیکی به روشهای ماسکینگام خطی و غیرخطی برای سیل تاریخ ۸۶/۲/۱۵..... ٦۷

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

هرگاه بر روی حوضه‌ای بارندگی صورت گیرد و شدت آن بیشتر از ظرفیت نفوذ آب به داخل خاک باشد، بخشی از آب حاصله از بارندگی در سطح حوضه باقی می‌ماند. این آب پس از پرکردن گودیهای سطح زمین در امتداد شیب، جریان پیدا کرده و از طریق شبکه آبراهه‌ها و سپس رودخانه اصلی از حوضه خارج می‌گردد. به این بخش از بارندگی رواناب سطحی گفته می‌شود. اگر حجم رواناب سطحی از ظرفیت متوسط رودخانه تجاوز کند، این حجم آب در نهایت بصورت یک موج در رودخانه حرکت خواهد کرد که اصطلاحاً گفته می‌شود سیلاب اتفاق افتاده و یا رودخانه طغیان کرده است. محاسبه و پیش‌بینی تغییرات حجم، سرعت و شکل یک موج سیلابی در حین گسترش آن در یک توده آب یا جریان رودخانه‌ای بصورت تابعی از زمان، روندیابی سیلاب نامیده می‌شود، به عبارت دیگر در روندیابی سیلاب می‌توان با در دست داشتن مشخصات هیدروگراف سیل در نقطه‌ای از بالادست رودخانه، هیدروگراف سیل را در نقطه‌ای دیگر در پایین دست رودخانه تخمین زد (صالحی و تقدیسیان، ۱۳۷۶ و علیزاده، ۱۳۷۸).

روندیابی سیلاب بسته به شرایط و اطلاعات موجود از رودخانه می‌تواند به روشهای مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام پذیرد. روندیابی سیلاب با روشهای هیدرولوژیکی تقریباً ساده بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند ولی نیاز به داده‌های هیدروگراف ورودی و خروجی سالهای متعدد قبلی دارند. روندیابی سیلاب با روشهای هیدرولیکی پیچیده بوده و دارای مراحل زیادی می-باشند. در این روندیابی به اطلاعات سالهای قبل نیاز نیست ولی اطلاعات و مشخصات هیدرولیکی کانال مورد نیاز است. اهمیت و لزوم استفاده از روشهای هیدرولیکی را می‌توان در عدم نیاز این روشها به آمار و داده‌های مقاطع خروجی بیان کرد. اگر مشخصات و اطلاعات هیدرولیکی به‌دقت تعیین شوند، نیازی به داده‌های مقطع خروجی نخواهد بود و از طریق روندیابی هیدرولیکی در هر مقطعی این داده‌ها قابل حصول است و داده‌های خروجی یک مقطع صرفاً برای صحت‌سنجی کاربرد خواهند داشت (مریم صمیمی و همکاران، ۱۳۸۵).

۱-۲ اهداف تحقیق

روندیابی سیلاب به دلیل کاربردی بودن آن اهمیت خاصی برای جامعه مهندسی دارد. در این میان جهت انجام روندیابی سیلاب در رودخانه به دلیل پیچیدگی آن تلاش‌های زیادی صورت گرفته و روشهای زیادی برای آن ارائه گردیده است. پرکاربردترین روش که سالها مورد استفاده جامعه مهندسی بوده و هنوز هم از آن استفاده می‌شود، روش ماسکینگام است. این روش و دیگر روشهای هیدرولوژیکی نیاز به داده‌های هیدروگراف سالهای متعدد قبلی دارند که ضعف عمده آنها محسوب می‌شود. محققان زیادی جهت رفع این مشکل برآمده‌اند که روش ماسکینگام- کونج نمونه‌ای از آن است که در آن پارامترهای مدل خطی ماسکینگام از روی مشخصات هیدرولیکی تخمین زده می‌شود. به دلیل رابطه غیرخطی دبی- ذخیره در طبیعت و ضعف مدل خطی ماسکینگام در این مورد دو مدل غیرخطی نیز برای روش ماسکینگام ارائه گردید ولی برای تخمین پارامترها در این مدل‌ها نیز نیاز به هیدروگراف سالهای متعدد قبلی می‌باشد. بعداً یک سری روشها نیز برای تخمین پارامترها در مدل خطی ارائه شد که در آنها پارامترها در بازه‌های رودخانه متغیر هستند. یکی از این روشها، روش ۴ نقطه‌ای تفاضلات محدود ماسکینگام می‌باشد که توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ ارائه شده است. این روش برپایه معادله موج دینامیک سنت- ونانت استوار می‌باشد و روشی هیدرولیکی برای روندیابی سیلاب است. در این تحقیق برای روندیابی از روش موج دینامیک و روش هیدرولوژیکی ماسکینگام با مدل‌های خطی و غیرخطی روی مسیر رودخانه مهران استفاده شده است و در نهایت نتایج بدست آمده مقایسه گردیده‌اند. با این روندیابی و مقایسه یک دید کلی از عملکرد روشها حاصل خواهد شد. با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌های هیدرومتری و رودخانه‌های فاقد آمار کشور روندیابی به روش موج دینامیک کارآمدی زیادی خواهد داشت و همچنین روش ۴ نقطه‌ای تفاضلات محدود ماسکینگام با توجه به شباهت به روش ماسکینگام، استفاده آن برای جامعه مهندسی کشور آسان‌تر از دیگر روشها هیدرولیکی خواهد بود.

فصل دوم

بررسی منابع

۲-۱ روندیابی هیدرولیکی

اساس روندیابی هیدرولیکی بر پایه معادلات سنت- ونانت[1] استوار است. معادلات سنت- ونانت شامل معادله پیوستگی[2] (۲-۱) و معادله اندازه حرکت[3] (۲-۲) می‌باشد.

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q \qquad (۲-۱)$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}=S_0-S_f \qquad (۲-۲)$$

که در این روابط A سطح مقطع، t زمان، V سرعت جریان، S_f شیب خط انرژی، S_0 شیب کف کانال، h ارتفاع سطح آب، g شتاب ثقل زمین، Q دبی جریان، q دبی ورودی یا خروجی در طول کانال و x طول کانال است. با توجه به اینکه چه تعداد از عبارت‌های معادله اندازه حرکت در معادله باقی می مانند، سه روش برای حل مسائل روندیابی سیل در رودخانه وجود دارد که عبارتند از :

۱- موج سینماتیک

۲- موج پخشیدگی

۳- موج دینامیک

$$S_f=S_0-\frac{\partial y}{\partial x}-\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}-\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} \qquad (۲-۳)$$

$Kinematic \rightarrow |$

$Diffusion \rightarrow |$

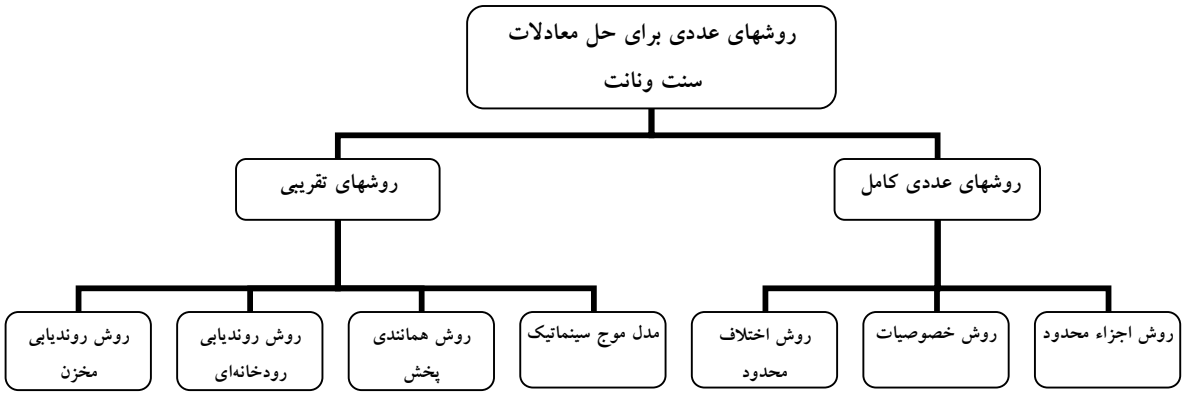
$Dynamic \rightarrow |$

معادله اندازه حرکت در این سه روش بصورت فوق می‌باشد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۳).

بطور کلی می‌توان گفت برای حل معادلات سنت- ونانت در روندیابی، سه روش عددی، تحلیلی و ترسیمی وجود دارد. حل معادلات سنت- ونانت به روش تحلیلی تنها در صورتی امکان‌پذیر است که حالات بسیار خاص و محدودی از امواج وجود داشته باشد که بتوان در آنها معادلات مذکور را با فرضیاتی ساده نمود. از طرفی استفاده از روشهای ترسیمی نیز به جهت احتیاج به زمان نسبتاً طولانی،

1-St.Venant equations
2-Continuity eqution
3-Momentum eqution

اخیراً کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. برای حل معادلات سنت- ونانت به روش عددی، روشهای مختلف وجود دارد که هر یک از نقطه نظر همگرایی، ثبات، دقت و راندمان امتیازات مخصوص به خود را داشته و می‌توانند به شکل زیر طبقه‌بندی شوند (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۲) :



شکل ۲-۱- طبقه‌بندی روشهای عددی برای حل معادلات سنت- ونانت

بطور کلی، روشهای روندیابی رودخانه‌ای و مخزن به دلیل اینکه مستقیماً از معادلات سنت- ونانت استفاده نمی‌کنند، جزو روشهای هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند و روشهای هیدرولیکی به چهار قسمت عمده تقسیم می‌گردند:

۱- روندیابی سینماتیکی

۲- روندیابی پخشیدگی

۳- روندیابی به روش همانندی پخش[1]

۴- روندیابی دینامیکی

1-Diffusion Analogy

۲-۱-۱ روندیابی سینماتیکی

در روندیابی سینماتیکی، معادله پیوستگی بصورت همزمان با یک شکل تقریبی از معادله اندازه حرکت حل می‌شود. این شکل تقریبی با صرفنظر کردن از عبارت‌های شتاب موضعی و جابجایی در معادله اندازه حرکت بدست می‌آید. عبارت باقیمانده نشان دهنده معادله مقاومت برای یک جریان دائم یکنواخت می‌باشد. به عبارت دیگر برای بقاء اندازه حرکت، جریان را دائم در نظر گرفته، اما اثرات غیردائمی بودن را افزایش یا کاهش عمق جریان بوجود می‌آورد و معادله اندازه حرکت بصورت زیر در خواهد آمد:

$$S_f = S_0 \qquad (۴-۲)$$

با جایگزین کردن مقدار S_f در رابطه‌ی مانینگ برحسب ضریب انتقال (K) خواهیم داشت:

$$Q = K\sqrt{S_0} \qquad (۵-۲)$$

ضریب انتقال تابع مشخصات هندسی مسیر جریان بوده و رابطه فوق نشان می‌دهد که مقدار Q فقط تابعی از عمق یا سطح مقطع جریان می‌باشد. بنابراین با اعمال قاعده زنجیری می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial Q}\frac{\partial Q}{\partial t} \qquad (۶-۲)$$

یا

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t}\frac{dA}{dQ} \qquad (۷-۲)$$

با جایگذاری این معادله در معادله پیوستگی با فرض $q=0$ و ساده کردن معادله حاصله، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_k \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad (۸-۲)$$

$$c_k = \frac{dQ}{dA} \qquad (۹-۲)$$

از آنجا که این یک مدل سینماتیکی است، موج را موج سینماتیکی می‌نامند. c_k دارای بعد سرعت است و نشان دهنده سرعت یک موج سیلابی می‌باشد (صالحی و تقدیسیان،۱۳۷۶). معادله (۲-۹) به

قانون کلایتز- سدن[1] معروف است و با مقادیر سرعت موج سیل مشاهده شده در رودخانه منطبق است. همچنین با استفاده از معادله (۲-۹) می‌توان نشان داد که ضریب b یا نسبت سرعت موج سینماتیک به سرعت جریان بصورت زیر می‌باشد:

$$b = \frac{c_k}{V} = \frac{A}{BK}\frac{dK}{dy} \qquad (۲-۱۰)$$

که در آن B عرض کانال و بقیه پارامترها مانند قبل می‌باشند. مقادیر b برای سه نوع جریان در کانالها در جدول ۲-۱ آورده شده است (شفاعی بجستان، ۱۳۸۳).

جدول ۲-۱- مقادیر b برای سه نوع کانال

نوع کانال	β با استفاده از معادله شزی	β با استفاده از معادله مانینگ
مستطیلی عریض	۳/۲	۵/۳
سهمی عریض	۴/۳	۱۳/۹
مثلثی	۵/۴	۴/۳

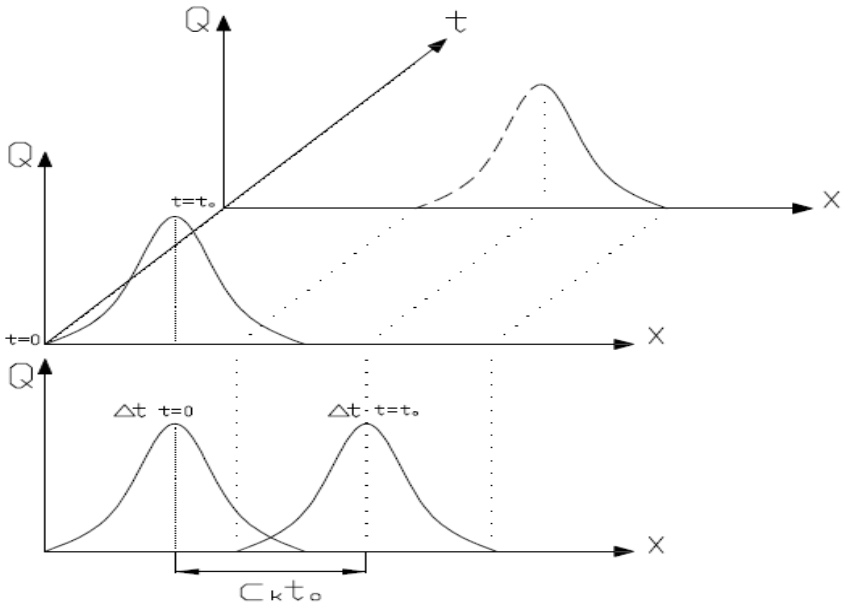
معادله (۲-۸) یک معادله دیفرانسیل جزئی درجه اول با Q بعنوان متغیر وابسته و t,x بعنوان متغیرهای مستقل می‌باشد. این معادله حرکت یک موج سیلابی را در قالب نرخ دبی بیان می‌کند. اگر c_k ثابت باشد، معادله (۲-۸) خطی است. دالمبرت[2] یک حل عمومی برای این معادله خطی را بصورت زیر ارائه داد:

$$Q = f(x - c_k t) \qquad (۲-۱۱)$$

در این حل، فرض می‌شود که مشتق‌های جزئی f نسبت به x,t وجود دارند. با مشتق‌گیری جزئی از معادله (۲-۱۱) نسبت به x,t و جایگذاری آنها در معادله (۲-۸) می‌توان ثابت کرد که معادله (۲-۱۱) حل عمومی معادله (۲-۸) است. در $t=0$ ، رابطه $Q = f(x)$ نشان دهنده شرایط اولیه می‌باشد. این منحنی تغییرات دبی Q با فاصله x را نشان می‌دهد. حل در زمان t_1 ، معادل $f(x - c_k t_1)$ و در زمان t_2 معادل $f(x - c_k t_2)$ می‌باشد. حال فرض می‌کنیم که یک ناظر با سرعت c_k در جهت پایین دست

1-Klietz-Seddon Law
2-Dalembert

حرکت کند. برای این ناظر، این منحنی همواره بصورت $f(x)$ ظاهر می‌شود. می‌توان همین نتیجه-گیری را با فرض یک سیستم مختصات متحرک، بصورتیکه $x = x - c_k t$ باشد، بدست آورد. در اینصورت، $Q = f(x)$ ، شکل منحنی حل همواره $Q = f(x)$ بوده و مستقل از زمان t می‌باشد. این توضیح نشان می‌دهد که هیدروگراف سیلاب در روندیابی سینماتیکی با سرعت c_k در جهت مثبت x حرکت می‌کند و شکل هیدروگراف تغییر نکرده و قله کاهش نمی‌یابد (شکل۲-۲).



شکل ۲-۲- انتشار موج سینماتیکی

بایستی دقت شود که این نتایج براساس فرض ثابت بودن c_k بدست آمده‌اند. اگر این فرض صحیح نباشد، یعنی dQ/dA ثابت نباشد، معادله (۲-۸) غیرخطی شده و شکل موج در حین عبور از کانال، به علت اثرات غیرخطی می‌تواند تغییر کند. تغییر در شکل موج بستگی به تغییرات c_k با Q دارد. اگر c_k همراه با افزایش Q ، افزایش یابد وجه مثبت موج در طول مکان تیزتر شده و در صورت کاهش c_k همراه با افزایش Q ، این وجه هموارتر می‌شود. گاهی اوقات وجه موج ممکن است به حدی تیز شود که تقریباً بصورت یک وجه قائم درآید؛ این حالت بعنوان یک پرش سینماتیکی نامیده می‌شود. مدل سینماتیکی بر حل معادله (۲-۸) استوار می‌شود. حل می‌تواند تحلیلی یا عددی باشد. در حل عددی، ممکن است شکل و ارتفاع موج همراه با توسعه آن تغییر کند. این تغییر صرفاً به علت

خصوصیات روش عددی بوده و نشان دهنده مشابه‌سازی پدیده واقعی فیزیکی نمی‌باشد. تغییر موج می‌تواند در شکل کاهش ارتفاع موج، تغییر در شکل و یا ترکیب هر دو باشد. کاهش در ارتفاع را پراکندگی[۱]، تغییر در شکل را انتشار[۲] و ترکیب در هر دو را پخش‌شدگی[۳] می‌نامند.

برای قابل کاربرد بودن مدل سینماتیکی در جریانهای رو زمینی[٤]، وولهایزر و لیگت[٥](۱۹۶۷) رابطه زیر را بدست آوردند:

$$K_f = \frac{S_0 L_0}{y_n Fr} \geq 20 \qquad (۱۲-۲)$$

که در آن K_f عدد جریان سینماتیک، S_0 شیب کف، L_0 طول صفحه جریان رو زمینی، y_n عمق نرمال، و F_r عدد فرود مربوط به جریان یکنواخت می‌باشد. موریس[٦] و وولهایزر (۱۹۸۰) ابراز داشتند که برای جریان‌های با عدد فرود کم، علاوه بر شرط ذکر شده هم‌چنین لازم است که شرط $K_f F_r^2 \geq 5$ برقرار باشد. با استفاده از یک حل تحلیلی معادلات خطی شده، پونس[۷] و همکاران (۱۹۷۸) نشان دادند که دقت نتایج محاسباتی برای یک اغتشاش سینوسی جریان متوسط بعد از یک پریود از انتشار در حد ۹۵ درصد می‌باشد، در صورتیکه پریود موج بدون بعد دارای شرط زیر باشد:

$$T_w = \frac{T S_0 V_0}{y_0} > 171 \qquad (۱۳-۲)$$

که در آن T پریود موج، V_0 سرعت متوسط مرجع و y_0 عمق جریان مرجع می‌باشد. پریود موج T را می‌توان دو برابر زمان بالا آمدن موج سیلاب در نظر گرفت (صالحی و تقدیسیان،۱۳۷۶).

1-Dissipation
2-Dispersion
3-Diffusion
4-Overland Flow
5-Woolhiser and Liggett
6-Morris
7-Ponce

۲-۱-۲ روندیابی پخشیدگی

در روندیابی پخشیدگی، شکل ساده شده‌ای از معادله اندازه حرکت به همراه معادله پیوستگی حل می‌شود. شکل ساده شده معادله اندازه حرکت شامل عبارت شتاب جابجایی که نشان دهنده تغییر مکانی در عمق جریان می‌باشد و همچنین عبارت‌های منبع بوده ولی از عبارت مشتق زمانی و همچنین عبارت‌های شتاب جابجایی در اثر تغییر مکانی در سرعت جریان، صرفنظر می‌شود (حامدی، ۱۳۸۲). بنابراین با این ساده سازی‌ها، معادله اندازه حرکت به شکل زیر در می‌آید:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \qquad (۱۴-۲)$$

با جایگذاری رابطه $Q = K\sqrt{S_f}$ در معادله (۲-۱۴) می‌توان نوشت:

$$\frac{Q^2}{K^2} = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \qquad (۱۵-۲)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۲-۱۵) نسبت به t خواهیم داشت:

$$\frac{2Q}{K^2}\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2Q^2}{K^3}\frac{\partial K}{\partial t} = -\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \qquad (۱۶-۲)$$

با فرض $q=0$ و مشتق‌گیری از معادله پیوستگی (۲-۱) نسبت به x ، با توجه به آنکه $\partial A/\partial x = B\partial y/\partial x$ و تقسیم بر BT ، نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} = -\frac{1}{B}\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \qquad (۱۷-۲)$$

با حذف $\partial^2 y/\partial t \partial x$ از روابط (۲-۱۶) و (۲-۱۷) خواهیم داشت:

$$\frac{1}{B}\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{2Q}{K^2}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q^2}{K^3}\frac{\partial K}{\partial t} = 0 \qquad (۱۸-۲)$$

با جایگذین کردن $\partial A/\partial t = -\partial Q/\partial x$ از معادله پیوستگی و مرتب کردن، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_D\frac{\partial Q}{\partial x} = m\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \qquad (۱۹-۲)$$

که در آن c_D سرعت موج پخشیدگی و μ ضریب پخشیدگی است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$c_D = \frac{Q}{K}\frac{dK}{dA} \qquad (۲۰-۲)$$