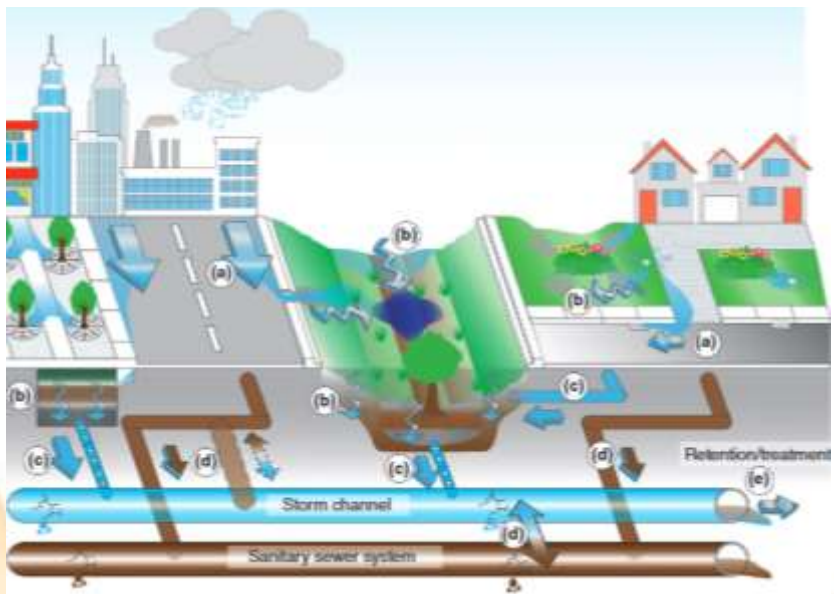


مهندسی آب و محیط زیست

مقدمه ای بر **هیدرولوژی شهری**
(رواناب رگبار-سازه هیدرولیکی - مدیریت رواناب آلوده)



مؤلفان:

دکتر فرهاد دلیری مشاور سنجایی و هیدرولوژیست
مدرس دوره های تخصصی پردیس فنی مهندسی
آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی



دکتر حسن سید سراجی مشاور سنجایی و مکانیک سیالات
عضو هیئت علمی پردیس فنی مهندسی
آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی



ادیت دوم ۱۴۰۱

دانشگاه رایگان www.absam.ir

به نام خدا

*Knowledge is empty of limit,
so we have not enough time to learn every thing if you want to deep it in the real world.
Farhad Daliri, 2015*



شرکت مهندسين آبسام (طرح و ساخت)

مدلسازی آب و محیط زیست
(اصول مقدماتی هیدرولوژی شهری)

تألیف:

دکتر فرهاد دلیری هیدرولوژیست
مدرس دوره‌های تخصصی دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

و

دکتر حسن سید سراجی مکانیک سیالات
عضو هیأت علمی دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

ادیت دوم ۱۴۰۱

سرشناسه : دلیری، فرهاد. متولد تهران -/ 1354

عنوان و نام پدیدآور : اصول مقدماتی هیدرولوژی شهری (رواناب رگبار - سازه هیدرولیکی - مدیریت رواناب آلوده) / تالیف فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی

مشخصات نشر : تهران: شرکت مهندسين آبسام، ۱۴۰۱ اديت دوم.

مشخصات ظاهري : ۹۳ ص.: مصور، جدول، نمودار چاپ اول.

شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۳-۲۱-۵

وضعيت فهرست : فيا

يادداشت : کتابنامه.

موضوع : رواناب شهری -- آنالیز رگبار - آبسطحي

موضوع : سيستم جمع آوری -- سازه هیدرولیکی

موضوع : مدیریت کمی و کیفی -- سيل - رواناب آلوده - فاضلاب

شناسه افزوده : شرکت مهندسين آبسام (طرح و ساخت)

رده بندي کنگره : ۱۴۵TC۱۳۹۳ ۴م/د

رده بندي ديويي : ۶۲۷

شماره کاتالانسی ملی : ۳۶۳۴۴۸۵

"کليه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت مهندسين آبسام می باشد"



مدلسازی آب و محیط زیست (هیدرولوژی شهری)

تالیف: فرهاد دلیری / حسن سیدسراجی

ویراستار و صفحه‌بند: ناشر

نوبت چاپ: چاپ نخست ۱۴۰۱.

ناشر: چاپ حسینی، کرج روبروی دانشگاه تهران

شمارگان: ۵۰۰ جلد

شابک: 5 _ 21 _ 6923 _ 600 _ 978

سفارش: www.absam.ir

بهاء بارگذاری در سایت آبسام

شرح حال مولفان

"این کتاب به کسانی تقدیم می‌شود که هدف آنها مدیریت آب و زمین است"

فرهاد دلیری متولد تهران

تخصص: هیدرولوژی و مدیریت آبخیز

تجارب و تحقیقات از ۱۳۸۰: سدسازی، کنترل سیل، آب زیرزمینی، تخلیه رسوب سد، آبخیزداری، نشست زمین، خشکسالی، رواناب شهری، هیدرواقلیم و برنامه ریزی.

سوابق تحصیلی (دانشگاه تهران)

Ph.D. (2016) دکتری مهندسی عمران-آب: مدلسازی پیش بینی اثر **هیدرولیکی** سیل آلوده سد روی آب زیرزمینی، فرصت مطالعاتی استرالیا.

MSc (۱۳۸۵) ارشد **برنامه ریزی مخازن سدها**، "منحنی فرمان **آبسطحی و آب زیرزمینی** جهت طراحی ارتفاع **سد** خاکی علویان با برنامه نویسی"

BSc (۱۳۸۰) لیسانس **هیدرولوژی**، "محاسبات سیل با روش شماره منحنی دلیری، اندازه گیری جریان نهر آبریز مرتعی با ردیابی و اشل Rod"

سوابق تدریس دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی عمران آب و محیط زیست عباسپور، دوره های آموزش تخصصی آب منطقه ای های کشور از ۱۳۹۰

- مدیریت و مدلسازی آب زیرزمینی، بهره برداری چاه شرب و آزمایش پمپاژ

- پیش بینی و کنترل سیل، رواناب شهری، آنالیز و تحلیل آمار، مدیریت رسوب سد، ریزگرده و فرسایش خاک حوضه، نصب و بهره برداری ادوات آب

- بحران آب، خشکسالی و برنامه ریزی کمی - کیفی پیوسته منابع آب - منابع طبیعی، آبخیزداری و ارزیابی زیست محیطی، رادار

- هیدرولوژی، هیدرولیک و هیدروژئولوژی - آموزشکده محیط زیست، دانشگاه علمی کاربردی کرج ۱۳۸۶

تالیفات (کتاب و مقالات) به جز متن حاضر سه کتاب دیگر به فارسی و دو کتاب زیر به زبان انگلیسی دالود رایگان از سایت www.absam.ir با عناوین:

1. F.Daliri. "Uncertainties in Flood Forecasting Systems Modeling", 2020, Absam EPC Co. press. 250p, Rivis 1.

2. F.Daliri. "Principle of Damming", Absam EPC Co. press. 2020, 55p, Edit1.

۳. فرهاد. دلیری. حسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (کنترل سیل، تامین آب مدیریت آب زیرزمینی)، شهری و روستایی - محاسبات عددی، شهید عباسپور، ۷۲۰ص چاپ دوم ۱۳۹۸.

۴. فرهاد. دلیری و حسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (تراکم سیستم آبخیزه و نشست زمین) ۱۰۳ص چاپ اول سال ۱۴۰۰.

۵. فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی. مدلسازی آب و محیط زیست (تخلیه رسوب سد)، چاپ اول سال ۱۴۰۱.

- چندین مقاله ISI با نوآوری (روش تصمیم گیری نیمه فازی دلیری DSM، روش ابداعی CN سیل، روش استوکستیک رواناب IUDRN در طراحی سدها و خشکسالی، توسعه روش شناسی

مفهوم یلان سفره و برداشت مجاز، توسعه روش شناسی برآورد زمان تمرکز و کاربرد مهندسی زمان ذخیره در کنترل سیل، تعریف سیستمی آبخیزداری و برنامه نویسی مدیریت یکپارچه حوضه

IWRM، توسعه مفاهیم برآورد سیل، توسعه مفاهیم واسنجی مولفه های یلان، بررسی تیپ رگبار در سیل و اصلاح تجربی اثر ذوب برف در مدل HEC-HMS، عدم قطعی پیش بینی سیل و ...

- بیش از ۶۰ گزارش فنی در مشاوران معتبر مانند مهتاب قدس (کمیته فنی اسبق)، سکو و ...

خلاصه بیوگرافی

ایشان از سال ۱۳۸۰ به عنوان هیدرولوژیست شرکت های مشاور آغاز به کار کرده و از سال ۱۳۸۹ همزمان در دفتر ارتباط با صنعت واحد سنجش آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف به عنوان

مدیر گروه آب، مشاور و داور مهندسین مشاور، دانشگاه و سازمان ها در تهیه دستورالعمل، با بررسی گزارش، مدیر بخش و مدیر پروژه مهندسی رودخانه شرکت های مشاور، کمیته راهبری

شکست سدها و تامین آب زیرزمینی برخی از آب منطقه ای های کشور ... مشغول بوده و از سال ۱۳۹۳ به عنوان ناظر فنی و عضو کمیته آبیگری و رسوب در تیم نظارت عالی پروژه اجرایی

سد (ECRD) و نیروگاه رودبار لرستان شرکت سکو و از سال ۱۳۹۶ به عنوان مدیرعامل و رئیس هیئت مدیره شرکت مشاور و پیمانکار مهندسی آبسام (طرح و ساخت) مشغول هستند.

حسن سید سراجی متولد تبریز

تخصص: دکتری مهندسی مکانیک سیالات

تجارب و تحقیقات از ۱۳۶۶: هیدرولیک، مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، ارزیابی زیست محیطی، رودخانه

بیوگرافی

- کمیته فنی بخش آب-انرژی و محیط زیست شرکت مشاور و پیمانکار مهندسین آبسام (EPC) از سال ۱۳۹۶
- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی از ۱۳۶۸ و تدریس در سایر دانشگاه های دولتی و آزاد از ۱۳۷۰ تا زمان حاضر
- کارشناس سدسازی در سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی و سازمان برنامه و بودجه بین سال های ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۸
- ارائه خدمات مشاوره ای در شرکت های مهندسی مشاور از ۱۳۶۶ تا حال
- مشاور طرح های تخصصی و مطالعاتی رسته منابع آب و وزارت نیرو، همایش های تخصصی و عضو هیأت تحریریه مجله سامانه منابع آب ایران از سال ۱۳۹۲

سوابق تحصیلی

Ph.D دکتری مهندسی مکانیک سیالات از دانشگاه کان فرانسه. رفتارهای هیدرودینامیکی عملیات **رسوب** زدائی سدها.

MSc زمین شناسی مهندسی از دانشگاه پاریس 7. بررسی **پایداری** خاک های آلی کناره های دریای خزر.

BSc مهندسی آبیاری و آبادانی از دانشگاه تبریز.

پیشگفتار

هدف از نوشتن مجموعه حاضر، که مبانی هیدرولیکی آن در کتاب زیر توسط همین مولفین در چاپ اول ۱۳۹۳ و چاپ دوم ۱۳۹۸ ارائه شده است: "فرهاد دلیری، حسن سیدسراجی (۱۳۹۸)، مدلسازی آب و محیط زیست (کنترل سیل، تامین آب، مدیریت آب زیرزمینی)، شهری و رستایی - محاسبات عددی، چاپ دوم، حمایت شرکت مهندسين آبسام (طرح و ساخت)" توسعه مفاهیم و روش های کاربردی حل مسائل جمع آوری رواناب شهری به صورت مهندسی و پرهیز از ارائه روابط و معادلات پیچیده هیدرولوژی تا حد امکان می باشد.

در این خصوص سعی شده تا در این مجموعه از مثال های واقعی مولفین و سایر مقالات روز دنیا جهت به روز شدن مطالب هیدرولوژی شهری که مناسب شرایط کشور ایران نیز باشد استفاده شود. عمده مباحث و چارچوب طراحی شده کتاب مرتبط با موارد زیر می باشد:

-فرایندهای هیدرولوژیکی موثر در رواناب شهری (هیدرولیک، هیدروسفر، پیوستگی، نفوذ، اندازه گیری و ..)

-توسعه مدل مفهومی سیستم شهری (کیفی: چارچوب مدل) و کمی (مقادیر عددی و ارزش ها و پارامترهای سیستم)

-محاسبات و آنالیز رگبار، رواناب و مواد محموله و ترکیب احتمالی با فاضلاب های شهری

-معرفی سیستم های اصلی زهکشی و جمع آوری مجزا و ترکیبی رواناب - فاضلاب

-روش های مدیریت سازه ای سیل شهری و مدیریت رواناب آلوده شهری (BMPs)

-ملاحظات فنی و موضوعات خاص در مدیریت رواناب شهری

- مثال از مدل های مناسب طراحی و شبیه سازی واقعه و پیش بینی و برنامه ریزی رواناب شهری

"لطفاً نظرات و پیشنهادات خود را از طریق ایمیل زیر منتقل فرمایید"

فرهاد دلیری و حسن سیدسراجی (ادیت دوم ۱۴۰۱)

Farhad.daliri@gmail.com

info@absam.ir

www.absam.ir

(دانلود کتاب رایگان از سایت)

صفحه	دامنه کاربرد- تعاریف-پیش نیازها
۸	فصل ۱ توسعه مدل مفهومی کیفی و کمی شهر
۱۰	۱-۱ سیستم های آب شهری
۱۱	۲-۱ فرایندهای هیدرولوژیکی
۱۲	۱-۲-۱ مولفه های اصلی رواناب شهری
۱۲	۱-۲-۲ اندازه گیری هیدرولوژی شهری
۱۸	۳-۱ فیزیوگرافی
۲۲	۱-۳-۱ DEM و DSM
۲۲	۱-۳-۲ واسنجی و مدلسازی زمان تمرکز
۲۴	
۳۲	فصل ۲ آنالیز رگبار-رواناب
۳۴	۱-۲ رگبار طرح
۳۴	۱-۱-۲ مناطق با آمار و بدون آمار
۴۰	۲-۲ هیدرولوژی رگبار
۴۱	۱-۲-۲ محاسبه بارش مازاد
۴۷	۲-۲-۲ محاسبه رواناب
۵۴	۲-۲-۳ محاسبه رواناب آلوده
	۳-۲ روندیابی
۶۷	۱-۳-۲ روندیابی کانالی و جریان روزمینی
۷۴	۲-۳-۲ روندیابی رواناب آلوده
۷۸	۴-۲ محاسبه و اندازه گیری دبی فاضلاب
۸۲	فصل ۳ سازه های جمع آوری و مدیریت رواناب شهری
۸۲	۱-۳ سیستم های ترکیبی و مجزا
۸۳	۲-۳ سازه های زهکشی رواناب (Stormwater drainage strutures)
۸۴	۱-۲-۳ زهکش های خیابان
۸۷	۲-۲-۳ سیستم سیلاب رو (Storm sewer)
۸۸	۳-۲-۳ کالورت-پل ها و کانال زهکشی سطحی
۸۸	۳-۳ طراحی سیستم جمع آوری فاضلاب (Sewerage)
۸۸	۴-۳ مدیریت کمی- کیفی رواناب شهری (BMPs)
۸۹	۵-۳ روش های خاص مدیریت رواناب شهری
	منابع

دامنه کاربرد- تعاریف -پیش نیازها

کتاب حاضر به طور خاص برای شهرداری ها و شرکت های آب و فاضلاب و دانشجویان لیسانس و ارشد رشته های مرتبط با هیدرولوژی در مدیریت رواناب شهری مفید می باشد. مباحث اصلی این مجموعه شامل محاسبات تولید رواناب، مواد رسوب و آلودگی تولیدی و حمل شده با رواناب، تولید و مقدار فاضلاب، طراحی سیستم های جمع آوری مجزا و ترکیبی فاضلاب-رواناب و مدیریت رواناب کمی و آلودگی های رواناب شهری بر اساس روش های موجود و به روز دنیا می باشد.

پیش نیازهای مطالعه این مجموعه گذراندن ۳ واحد اصول مهندسی هیدرولوژی و هیدرولیک در مقطع لیسانس است.

باتوجه به شکل روی جلد کتاب، سیستم های جمع آوری رواناب و فاضلاب ممکن است به صورت مجزا یا ترکیبی باشند. عمدتاً "شروع زهکش های فرعی رواناب از جوی و دریاچه های آبرو (Gutter) آغاز و سپس به سیلاب رو اصلی مدفون یا Storm sewer (e) زهکش می شود. تولیدات فاضلاب های خانگی و غیره نیز از جمع کننده های فرعی مدفون وارد فاضلاب رو اصلی یا Sanitary sewer (d) می شود. سپس توسط کانال های سطحی زهکشی، رواناب ها ممکن است بدون تصفیه وارد دریاچه یا رودخانه ها شده و یا پس از تصفیه به صورت مجزا یا ترکیب با فاضلاب ها مدیریت شوند.

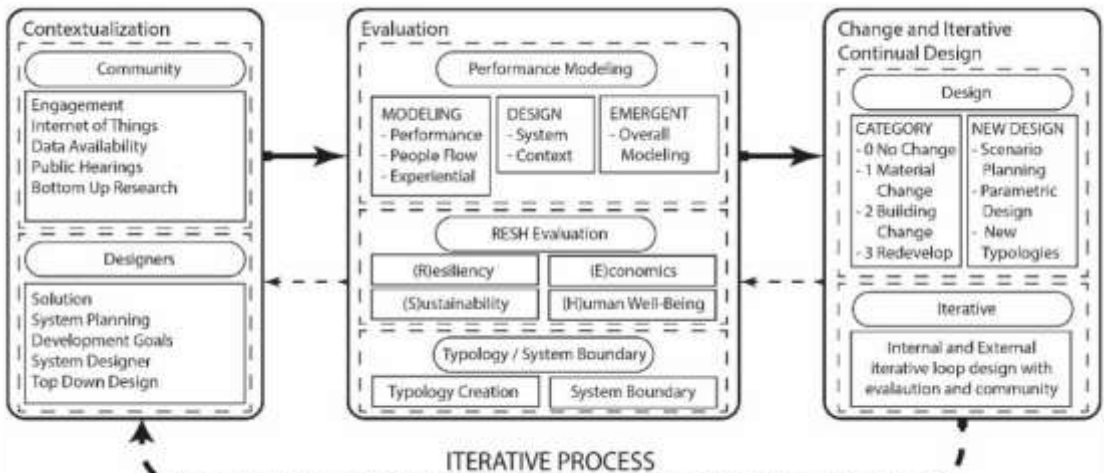
در حوضه های روستایی واژه کلیدی رواناب (Runoff) در واقع شامل کلیه رواناب های زیرسطحی (پایه و تاخیری و نیمه تاخیر) و مستقیم (سیل) می باشد [1]. در حوضه های شهری نیز در واقع همین معنی وجود دارد ولی به دلیل ناچیز بودن سطح نفوذ و سایر مولفه های جریان، و لذا خطی بودن پاسخ حوضه شهری به رگبار، واژه مذکور معادل آبسطحی یا سیل یا همان رواناب مستقیم لحاظ می شود. با این وجود در محاسبات، هیدرولوژیست می بایست به این اختلاف توجه داشته باشد و لذا در انتخاب مدل یا روش مناسب با شرایط حوضه شهری از نظر مبدل های تبدیل بارش-رواناب دقت لازم در تفسیر نتایج را بنماید. دبی (Dischrge) یا مقدار رواناب (Runoff rate) یا مقدار جریان (Flow rate) یکی بوده و معادل حجم جریان عبوری از مقطع عمودی سازه یا جریان می باشد. رواناب خود را از سطح حوضه و نقاط مختلف با زمان بندی و مقدار متفاوت به نقطه طراحی یا خروجی می رساند (Basin Outlet). نمودار دبی - زمان را هیدروگراف در نقطه طراحی می نامند. برای یک رخداد رگبار به شکل زنگوله ای با یک قله و برای چند رگبار مرکب با چند قله نمایان می شود. اگر بارش ثابت باقی بماند از نظری تئوری هیدروگراف می تواند بدون قله مشخص و به موازات محور طول ها ادامه یابد.

این صفحه خالیست



فصل ۱ توسعه مدل مفهومی کیفی و کمی شهر

ابتدا می بایست ارتباط مولفه های سیستم شهر با یکدیگر و مولفه های موثر شناسایی و به صورت یک مدل مفهومی اجزای سیستم ترسیم شود تا مدل کیفی شکل بگیرد (بند ۱-۲-۱). بدیهی است که با توجه به دقت مورد نیاز ممکن است از نقشه های پایه با دقت ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۵۰۰۰۰ برای مطالعات هیدرولوژی و هواشناسی و ترسیم مدل کیفی و از نقشه برداری زمینی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ تا ۱:۵۰۰ برای ترسیم پرو فایل و تهیه نقش های اجرایی و دفترچه اسناد مناقصه بهره برد. در این خصوص از اطلاعات تولیدی DEM جهت استخراج پارامترهای فیزیوگرافی، وضع موجود زهکشی و .. تعیین می شود. همچنین از نقشه های ازبیلست سازه های موجود فاضلاب رو و سیلاب رو و سایر تاسیسات شهری جهت طراحی ها و توجه به حریم قانونی آنها (خطوط گاز، آب و ..) استفاده می شود.



شکل ۱: چارچوب مفهومی از فرایند طراحی سیستم شهری [2]

سپس جهت تبدیل مدل مفهومی کیفی به مدل کمی می بایست از اطلاعات عددی شامل طول مسیر بازه ها، مقدار سطح نفوذ پذیر و ارزش نفوذ، رگبار، زمان تمرکز و .. استفاده نمود. این مدل ممکن است با روش های منطقی و تجربی یا با ورود به مدل های عددی وارد محاسبات گردد.

۱-۱ سیستم های آب شهری

به طور کلی سیستم های آب شهر در سه کلاس زیر تقسیم می شوند:

-آبرسانی و آب شرب (تقاضا، تصفیه و توزیع آب با لوله و به صورت تحت فشار).

-سیستم فاضلاب (دفع فاضلاب به صورت آزاد، تصفیه خانه و برخی موارد تلبمه خانه).

-زهکشی شهری (جمع آوری رواناب - آزاد و تحت فشار / احتمال آلودگی و ترکیب با فاضلاب).

سیستم آبرسانی به کتاب حاضر ارتباط ندارد. اما دو سیستم جمع آوری فاضلاب و زهکشی رواناب

اگر به صورت مجزا طراحی و اجرا شوند تنها در زمان اجرا ملاحظاتمانند قرار گیری سیستم رواناب

روی سیستم فاضلاب برای کاهش آلودگی رواناب و مواری چنین می بایست ملاحظه شود. اما در

سیستم های ترکیبی (Combined) دبی و مشخصات هر دو مولفه رواناب رگبار و فاضلاب های

تولیدی می بایست در طراحی و مدیریت رواناب شهری دیده شود(شکل ۲).



شکل ۲: سیستم ترکیبی دفع رواناب و فاضلاب شهری

۲-۱ فرایندهای هیدرولوژیکی

فرایندهای اصلی هیدرولوژی از قواعد زیر نشأت می گیرد (Chow, 1988):

- تئوری انتقال رینولدز
- معدلات پیوستگی
- پیوستگی و گسستگی زمان - مکان
- معادلات مونتوم
- هیدرولیک کانال (جریان و محیط زیست)
- هیدرولیک محیط متخلخل (اشباع و غیر اشباع)
- بیلان انرژی
- فرایندهای انتقال (انتقال مولکولی، جرمی و تشعشع).

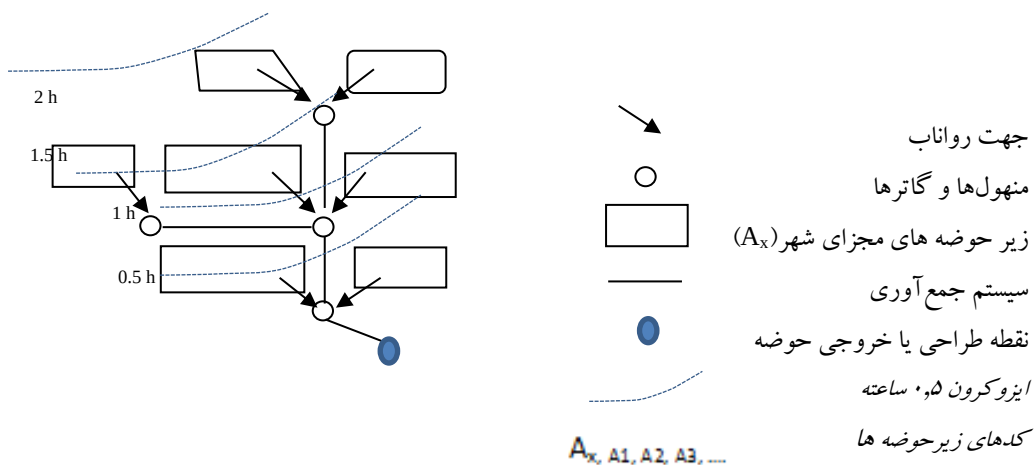
کلیه معادلات بالا می توانند به صورت قطعی (Deterministic) یا احتمالاتی (Stochastic) نوشته شوند. در حالت قطعی می توانند به صورت توزیعی در مکان و زمان (استوکاستیک وابسته و مستقل به زمان و مکان) و با شرایط دائم (Steady) یا غیر دائم (unsteady) نوشته شوند. این موارد هر یک در جای خود در حد نیاز بحث می شود و جزئیات در مرجع [1] قابل مطالعه است.

۱-۲-۱ مولفه های اصلی رواناب شهری

در مناطق توسعه نیافته روستایی و کوهستانی، مقدار رواناب عمدتاً "متأثر از اندرکنش ذخیره گودال ها و حفره های طبیعی مسیر، الگوی زهکشی رودخانه ها، نفوذ خاک یا درزو شکاف سازندهای زمین شناسی، شیب های متغیر بوده و نوع خاک، پوشش گیاهی و توپوگرافی نقش اصلی دارند. در مناطق شهری نفوذ به دلیل سطوح تغییر یافته به جاده و ساختمان ها بسیار کم شده و لذا تا ۸۰ درصد مقدار رواناب افزایش پیدا می کند. علاوه بر این، سطح حوضه کم شیب تر شده، مناطق با کاربری سنگفرش و خاک سفت شده در سطح لایه به صورت عرصه های پراکنده، پوشش طبیعی درختان حذف و به صورت فضای سبزیهای کوچک و پراکنده تبدیل شده است. همچنین به جای شبکه رودخانه، شبکه ای از لوله، کانال با جمع کننده های باران، پشت بام و.. جایگزین شده که باعث

کاهش زمان تمرکز می شوند (شماتیک سیستم حوضه شهری). این موارد باعث افزایش رواناب و سیلگیر شدن و فرسایش رودخانه ای مناطق پایین دست رودخانه های پذیرنده این رواناب می شود. بدیهی است می بایست کلیه رودخانه های کوچک و بزرگ ورودی به سیستم شهر مشخص و آبریز آن ها تا بسته شدن کامل حوضه مشخص گردد. در داخل حوضه های شهری نیز برای مراحل شناخت یا فاز اول نیاز به نقشه های دقیق تر مثلاً "۱:۲۰۰۰" پلان خیابان ها، شبکه لوله و منهول ها، کانال، رودخانه، گاترها، فضای سبز و ساختمان های منطقه است. نمونه ای از طرح شماتیک مدل مفهومی ساده شده سیستم های جمع آوری سیلاب و فاضلاب شهری ممکن است به صورت زیر باشد.

در مطالعات سیلاب شهری (Urban flood) می بایست دبی سیل را در ورودی منهول ها و سایر سازه های جمع کننده مانند لوله ها، دهانه های ریزش (Drop manholes) باران و برف و غیره محاسبه و در طول مسیر سیستم جمع آوری و تخلیه، روندیابی نمود. همچنین ممکن است در طول بازه روندیابی انواع سازه های هدایت یا کنترل جریان مانند مخازن کمی یا مدیریت کیفی وجود داشته باشد که می بایست تاثیر آنها نیز در روندیابی توسط هیدرولوژیست بررسی شود.



شماتیک مدل مفهومی ساده سیستم جمع آوری آب سطحی مناطق شهری

علاوه بر مسائل کمی سیل شهری، اغلب آلاینده های از نوع خشک ناشی از فعالیت های انسان در هوا و روی زمین نشست کرده که می تواند توسط باد یا باران های بعدی به صورت رواناب آلوده اولیه منتقل شوند. همچنین علاوه بر این آلاینده های اولیه در سطح شهر، سایر آلاینده های غیر نقطه ای مانند خاک های ناشی از فرسایش عملیات ساخت و ساز، روغن و گریس و لنت خودروها،

کودهای نیتروژن و فسفر فضای سبز، آفت کش های گلخانه ها، فضولات حیوانات خانگی، گرد و غبار هوا، آلودگی های غیر قانونی نامشخص، آلودگی های نقطه ای مانند نشت از پمپ بنزین ها و ... باعث اهمیت توجه زیست محیطی به رواناب آلوده شهری شده است.

اگرچه توسعه روش ها و مدل های هیدرولوژیکی مشابه مفاهیم مکانیک سیالات می باشد اما به دلیل بزرگی و پیچیدگی سیستم هیدرولوژیکی، در کنار درگیر بودن توام زیر سیستم های متعدد (آب سطحی-آب زیر سطحی-آب اتمسفر) نتایج با تقریب و عدم قطعیت بیشتری همراه خواهد بود. لذا مطالعه اثر آب و هوا و انرژی های حرارتی موثر در فرایندهای آب موجود در اتمسفر با سایر زیر سیستم ها، روش های آنالیز آماری در کنار درک مفاهیم فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی به دلیل تصادفی بودن ورودی سیستم (رگبار) و تغییر پذیری بالا ناگزیر است. بر این اساس مولفه های اصلی سه زیر سیستم مذکور به شکل زیر معرفی می شود که در هر حوضه شهری ممکن است اثر این مولفه ها در تولید رواناب یکسان نباشد:

- مولفه های زیر سیستم جوی یا آب اتمسفر (Atmospheric water)

بارش: عمدتاً "به صورت باران و تحت شرایطی برف در تولید رواناب مهم می باشد.

تبخیر: این مولفه در شهر مربوط به سطوح غیر زنده بوده و مهم می باشد.

انواع گیرش: این مولفه در حوضه های شهری عمدتاً "مربوط به گیرش ساختمان ها بوده و در حوضه های روستایی این نوع گیرش مربوط به پوشش گیاهی است. لذا پوشش گیاهی شهرها نیز این نوع گیرش را دارند.

تعرق و تبخیر - تعرق. این نوع مولفه در شهر مربوط به پوشش گیاهی بوده و کمتر اهمیت دارد.

تعریق: این نوع مولفه در شهر به ندرت وجود دارد.

این زیر مولفه ها ممکن است به یکدیگر نیز در حین وقوع تبدیل شوند. مثلاً "باران حین ریزش ممکن است به دلیل دمای محیط تبدیل به بخار شد.

- مولفه های زیر سیستم آب سطحی (Surface water)

رواناب سطحی (Surface runoff). رواناب سطحی یا مستقیم یا سیل در واقع مولفه اصلی

مورد نظر در مجموعه حاضر است که باید بر اساس مشخصات آن سیستم های مدیریت رواناب

شهری طراحی شوند. این مولفه در طی مسیر ممکن است تبدیل به جریان زیر سطحی و یا برعکس از سفره ها تغذیه نیز شود.

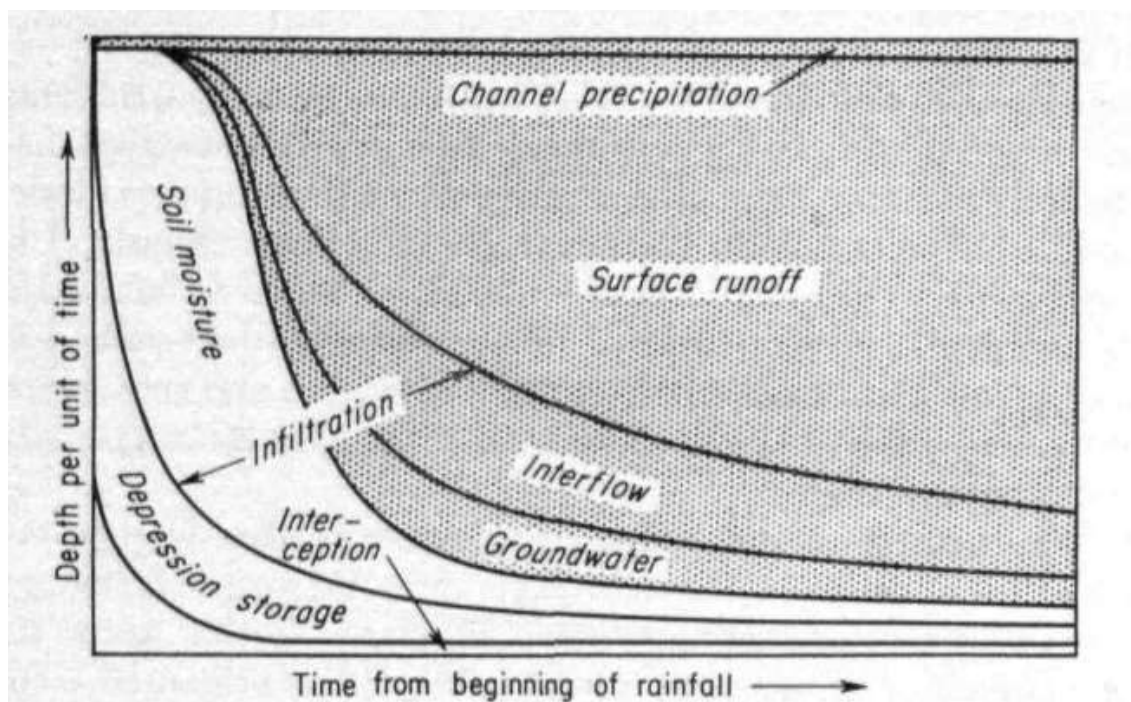
جریان روزمینی (Overland flow). این مولفه به صورت ورقه ای روی خاک پس از اشباع نسبی یا سطح بزرگراه و فرودگاه ها در اوایل بارش یا عمدتاً "روی سطوح نفوذ ناپذیر شهری از ابتدا تا انتهای رخداد بارش مشاهده می شود.

- مولفه های زیر سیستم آب زیر سطحی (Subsurface water)

زیر مولفه آبسطحی ممکن است در سطوح نفوذ پذیر به مولفه نفوذ سطحی یا عمقی و سپس به سفره آبهای زیرزمینی (Groundwater flow) یا مولفه جریان زیر سطحی (Subsurface flow) یا رواناب سطحی با توجه به شرایط زمین شناسی و توپوگرافی سطح شهر پیوندد. این نوع مولفه ها وقتی که سطح سفره بالا باشد اهمیت داشته و درک این مولفه ها در انتخاب روش محاسبه رواناب و زمان تمرکز حائز اهمیت است.

به طور کلی برخلاف تصور می توان مهم ترین مولفه های موثر در تشکیل رواناب شهری را شامل ذخیره گودالی، نفوذ، و گیرش از نوع ساختمانی و گیاهی (در زمان های طولانی باید تبخیر نیز محاسبه شود) دانست. در واقع پس از کسر این مولفه ها از باران که البته نسبت به زمان ثابت نیستند، مقدار بارش مازاد (rainfall excess) که متناسب با رواناب شهری (Urban Runoff) است، به دست می آید. البته در مناطق شهری بسته به میزان توسعه ممکن است اثر گیرش یا نفوذ و ذخیره گودالی کم و متفاوت باشد. جهت بررسی چگونگی تغییر فرایندهای آبسطحی در طول یک بارش، می توان یک بارش بدون توقف روی یک حوضه را در نظر گرفت (شکل ۳).

محور عمودی در شکل ۳ معرف نسبت رواناب به بارش بوده و محور عرض ها زمان می باشد. اثر ذخیره موقت (Detention) و دائم (Retention) حوضه به ترتیب مربوط به اثر ذخیره گودالی است که زودگذر بوده و در واقع ناشی از عبور جریان از روی گودال ها یا چاله های ریز مسیر ایجاد می شود. اما اثر ذخیره دائم در واقع طولانی تر بوده و اثر آن بواسطه نفوذ یا تبخیر از بین می رود.



شکل ۳: رفتار مولفه های مختلف رواناب با بارش ثابت روی حوضه فرضی [3]

در واقع وقتی ذخیره موقت گودالی پر می شود (در شهرها می تواند مناطق خاکی، فضای سبزه ها، پشت بام ها، و حتی حفره های مسیرهای نفوذ ناپذیر باشد) جریان سطحی از روی این ذخائر موقت آغاز می شود. در این شرایط هنوز خاک زیرین غیر اشباع است (در مناطق شهری علاوه بر این موضوع اگرچه با درصد ناچیز، اتصال جریان های سطوح نفوذناپذیر به سطوح نفوذ پذیر یک زمان موقت ایجاد می کند) و لذا جریان روزمینی از نوع غیر اشباع (جریان روزمینی هورتنی نیز می نامند) شکل می گیرد. سرانجام این جریان خود را به جریان کانالی (Channel flow) می رساند. اندازه گیری یا برآورد جریان کانالی همان رواناب مستقیم یا رواناب شهری (آبسطحی یا سیل شهری) است که هدف اصلی هیدرولوژی شهری است. لذا سایر مولفه های دیگر آبسطحی و زیرسطحی (شکل ۳) باتوجه به زمانبندی سیستم، کل رواناب خود را یا بخشی از آن را ممکن است به این جریان کانالی برسانند. البته بارش کانالی (Channel precipitation) مستقیم وارد جریان کانالی می گردد.

جریان روزمینی هورتن (غیر اشباع) مناسب حوضه های شهر و روستایی با نفوذ کم در واقع هورتن (۱۹۳۳) جریان روزمینی را به این صورت تشریح کرد که از مقدار گیرش گیاهی صرف نظر نمود و گفت رواناب سطحی برابر بخشی از بارش (i) است که توسط خاک و فرایند نفوذ (f) جذب نشده است. او این مقدار را رواناب سطحی و با فرض بیشتر بودن i معادل i-f قرار داد. او متوجه شد که ابتدا یک جریان ورقه ای روی سطح در حد چند سانت ایجاد شده و سپس به تدریج در انتهای دامنه متمرکز و به جریان کانالی وارد می شود. در این شرایط ذخایر دائم و موقت اثر خود را می گذارند و خاک نیز آب نفوذ کرده را ذخیره کرده و سپس بخشی را تبخیر و بخشی به تدریج به عنوان مولفه جریان زیر سطحی به صورت جریان پایه (Baseflow) در زمان های بدون بارش وارد رودخانه ها می کند. این نوع جریان پایه (Dry-weather flow) که در زمان بدون بارش نیز دیده می شود در حوضه های شهری اغلب وجود ندارد و در صورت وجود می بایست آن را به کمک آنالیز هیدروگراف منحنی خشکیدگی تاريسمان حساب و به هیدروگراف رواناب سیل اضافه نمود [1].

فرضیات هورتن برای جریان روزمینی برای سطوح نفوذ ناپذیر شهری و در حوضه های طبیعی با لایه های خاک نازک و ظرفیت نفوذ کم مناطق خشک و نیمه خشک مناسب است. اگرچه این مفاهیم اصلاح شده و به نام روش نفوذ اصلاح شده هورتن نیز استفاده می شود.

جریان زیر سطحی

وقتی نفوذ خاک بیش از بارش باشد به ویژه در مناطق مرطوب با پوشش گیاهی، شرایط هورتن برقرار نشده و لذا مولفه اصلی رواناب، جریان زیرسطحی خواهد بود. این جریان در شرایط اشباع و غیر اشباع با توجه به هدایت هیدرولیکی مسیر، رفتارهای متفاوت دارد. در این شرایط مولفه رواناب زیرسطحی نقش اصلی رساندن باران را به صورت زیر سطحی (رواناب نیمه تاخیری-دلیری ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ مرجع ۱) به کانال اصلی دارد (Freeze, 1974). در حوضه های شهری اغلب وجود ندارد.

جریان روزمینی اشباع

در این شرایط ابتدا جریان زیرسطحی باعث اشباع شدن خاک می شود و در صورت بارش روی این خاک، جریان روزمینی اشباع روی خاک اشباع تشکیل می شود. در جریان روزمینی هورتین در واقع

خاک از بالا توسط نفوذ اشباع می شود ولی در جریان روزمینی اشباع، خاک از زیر توسط جریان زیرسطحی اشباع می شود. این نوع جریان اغلب در پایاب تپه ها و نزدیک کناره رودخانه ها دیده می شود. لذا باتوجه به سرعت کم جریان های زیرسطحی، بدیهی است که در شرایط عادی این نوع جریان روزمینی اشباع، در حوضه ها نمی تواند بواسط جریان زیرسطحی در سطح وسیع و در دوره یک بارش ایجاد گردد. البته به صورت استثنایی ممکن است جزئی از حوضه های طبیعی باعث چنین رفتاری باشد که هیدرولوژیست های جنگل به آن سطح جزئی (Partial areas) یا مناطق با منشا متغیر می نامند (Hewlett, 1982).

۱-۲-۲ اندازه گیری هیدرولوژی شهری

اندازه گیری های هیدرولوژیک به درک فرایندهای هیدرولوژیک کمک می کند. لذا با این داده ها و پارامترهای اندازه گرفته شده در روش های تجربی و مدل های عددی، شبیه سازی سیستم شهری نیز جهت طراحی، آنالیز و تصمیم گیری با دقت بیشتری انجام می گیرد. این داده ها به دشت تغییر پذیر و غیر قطعی نسبت به زمان و مکان بوده و لذا تعداد و موقعیت اندازه گیری ها بسیار حیاتی است. مراحل اندازه گیری و پایش داده ها شامل گام های زیر است:

Sensing درک اندازه یک پدیده توسط سنسور (حسگر؛ Radar) به پیام قابل مخابره.

Recording ثبت و ضبط اطلاعات حس شده روی کاغذهای الکترونیکی یا مشخص.

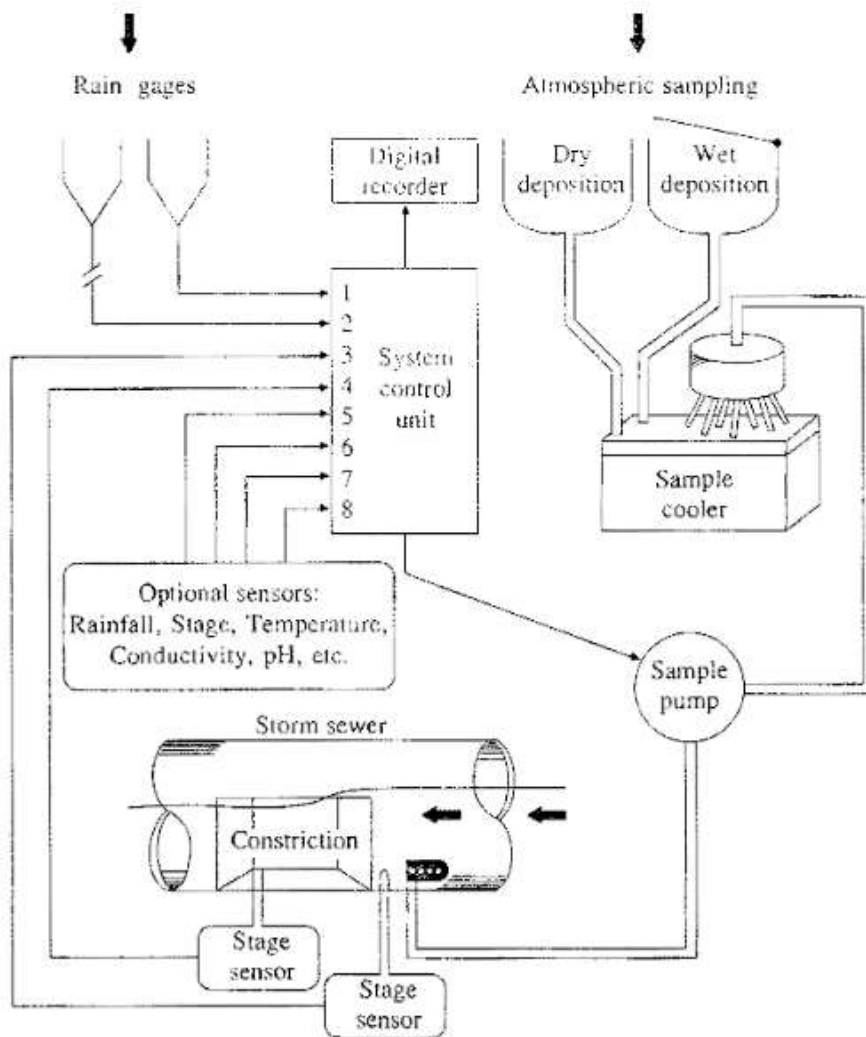
Transmission انتقال داده های ثبت شده به ایستگاه مرکزی پردازش (Dispatching)

Translation تبدیل داده های میدانی ابزار به داده های قابل استفاده در مدل و ذخیره دائمی.

Editing کنترل داده های مشکوک و حذف آنها.

Storage بایگانی نهایی داده ها روی دیسک و کامپیوتر به صورت قابل استفاده کاربر.

از شکل ۴ مشخص است که مهمترین تفاوت پایش شهری با مناطق روستایی و طبیعی شامل اندازه گیری زیر زمینی در محل عبور سیلاب رو و فاضلاب رو ها می باشد که جهت اندازه گیری جریان و کیفیت سیال با پمپ نصب شده اند. عمده این ابزار به صورت آنلاین و آماده باش بوده (Standby) و در لحظه ثبت و آغاز بارش شروع به برداشت می کنند.



شکل ۴: سیستم پایش هیدرولوژی شهری Jennings, 1982 [3]

در خصوص اندازه گیری در سیلاب رو ها و برخی موارد رودخانه های شهری می توان با نصب پارشال فلوم یا سرریز (شکل ۵) (در روش دستی می توان با ابزار مولینه سرعت را اندازه گیری کرد- به کتب هیدرولوژی عمومی مراجعه شود) بین ارتفاع جریان و دبی لحظ ای عبوری از مقطع مشخص رابطه برقرار و منحنی تدام جریان (Rating curve) را برای مقطع مورد نظر ترسیم تا در مواقع مورد نیاز بتوان از روی ارتفاع جریان دبی جریان را برآورد نمود. در کانال های مشنوری شهری برخلاف رودخانه ها، اصلاح دوره ای منحنی تداوم جریان به دلیل رسوبگذاری و آبستگي و تغییر شکل

مقطع خیلی ضرورت ندارد ولی کنترل دوره ای جهت حذف آت و آشغال ضروری است اگرچه این سیستم های شهری اغلب خود تمیز کن (Auto-clean) طراحی می شوند.



شکل ۵: سیستم پایش هیدرولوژی شهری - سرریز بله پهن

باران: در مناطق شهری باتوجه به دسترسی آسان می توان از بارانسنج های غیر ثابت بهره برد ولی وجود بارانسنج ثابت نیز برای ثبت های توگراف بارش ها ضروری است. در مناطق کوهستان می توان معیار شعاع ۲۵ کیلومتر را برای فاصله بین ایستگاهی برای شرایط مساعد و شعاع بیشتر باتوجه به مسائل اقتصادی و دسترسی تعیین نمود ولی این فاصله در مناطق شهری بسیار کمتر است. جهت آنالیز رگبارها نیاز به داده های ثبت شده با فواصل کمتر از ۱ ساعت و بیشتر می باشد و لذا نصب ایستگاه های سینوپنیک در کنار سایر ایستگاه های کلیماتولوژی جهت ترسیم های توگراف و توزیع مکانی-زمانی رگبار الزامی است.

برف: مقدار بارش در ایستگاه های بارانسنج شامل کلیه نزولات باران و برف است. اما اگر مطالعات ذوب برف و رواناب برف نیاز است باید اطلاعات عمق و دانسیته و سطح برف نیز برداشت شده باشد. اگرچه می توان از ترکیب روش های فیزیک برف و آنالیز آماری نیز این اطلاعات را برآورد نمود. دانسیته برف از نمونه گیری توسط لوله های چگالی و آزمایش میدانی نسبت آب معادل به برف تعیین می شود. همان لوله نیز مدرج بوده و عمق برف در نقاط معرف تعیین می گردد. روش های اتوماتیک

و آنالین نیز مانند بالشتک برف سنجی (Snow pillow) مجهز به حسگرهای فشار سنج برف و ادوات مخابره از راه دور وجود دارد.

گیرش: در شهرها ساختمان و پوشش گیاهی دارای گیرش هستند. به طور کلی می توان از قراردادن بارانسنج زیر پوشش گیاهی و در خارج از آن و محاسبه اختلاف آنها، مقدار گیرش را اندازه گرفت. مقدار جذب ساقه گیاهی نیز به کمک ابزار رینگ شکل قابل برآورد است. از این نتایج جهت توسعه جداول و ضرائب روابط تجربی به منظور برآورد این مولفه از رواناب شهری استفاده می شود.

تبخیر: در حوضه های شهری و روستایی استفاده از تشت تبخیر و ضرائب اصلاحی تشت کاربرد دارد. جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی نیز از لایسیمتر استفاده می شود. لایسیمتر مجموعه ای شبیه سازی شده به صورت مدل فیزیکی است که مقدار تبخیر واقعی از سطح غیر زنده و زنده را توام اندازه می گیرد..

تراز و سرعت آب: باتوجه به گرادیان سرعت در مقطع کانال ها می بایست سرعت نقطه ای به کمک ابزاری مانند مولینه یا سایر ادوات در پروفیل طولی و عرضی اندازه گیری و سپس منحنی های هم سرعت مقطع ترسیم شود. سرعت متوسط اغلب حدود ۰,۶ از کف و در وسط کانال منشوری می باشد ولی برای هر مقطع هندسی رابطه و نقطه مشخص وجود دارد. ابزار سطح سنج نیز بسیار متنوع بوده و از ساده ترین آنها می توان به لوله های حاوی چوب پنبه در داخل لمینگراف نام برد که تنها مناسب ثبت یکبار رخداد سیل هستند و برای بار بعدی باید چوب پنبه به جای اول بازگردانده شود. ابزرا تالیدمس نیز به صورت دیجیتالی نوسان آب را به کمک حسگر شناور خود روی کاغذ به صورت خود کار و دائم ثبت می کند. این ابزار می توانند به صورت آنالین پیامک ارسال کنند.

رطوبت خاک و نفوذ: با نمونه گیری از خاک و ارسال به آزمایشگاه تحت شرایط استاندارد، و استفاده از آون می توان مقدار آب در حجم خاک را مشخص نمود. این روند برای استخراج اطلاعاتی

چون هدایت هیدرولیکی و ارتفاع مکش محاسبه نفوذ پذیری خاک و محاسبات بارش مازاد کاربرد دارد. نفوذ خاک ممکن است سطحی (Infiltration) یا عمقی (Percolation) باشد.

آب زیرزمینی: در حوضه های شهری اطلاع از نوسان سفره به ویژه در محیط غیر اشباع ضروری است. در محیط اشباع و عمق های پایین می توان به کمک نصب دیتا لاگر داخل چاه مشاهده ای به صورت آنلاین یا دستی از نوسان سطح سفره آزاد و یا با نصب پیزومتر در سفره محصور اطلاعات را استخراج نمود. برای اطلاع از اثر و وضعیت سفره نزدیک سطح زمین می بایست تمهیدات خاص طراحی شود. در این خصوص دو حالت عمده وجود دارد. افزایش تراز سفره در تشکیلات شنی و آهکی و افزایش تراز در تشکیلات متوسط و ریز. در حالت دوم می توان از همان روش رطوبت سنج استفاده نمود و در حالت اول قوانین هیدرولیک کانال های روباز (مشابه رودخانه ها مرجع ۱) و یا لوله های تحت فشار (اندازه گیری با مانومتر) صادق است.

۱-۳-۱ فیزیوگرافی

۱-۳-۱-۱ DEM و DSM

جهت مطالعه رواناب و هواشناسی نقشه های رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ یا ۱:۵۰۰۰۰ در محیط GIS کفایت می کند. لذا DEM این نقشه ها برای تهیه نقشه های شیب و جهت و ارتفاع و بستن مرز حوضه آبگیر مناسب است. نقشه های DSM دقت بیشتری نسبت به نقشه های DEM داشته زیرا علاوه بر تراز اطلاعات سطح زمین مانند ساختمان ها و گودبرداری ها و پیاده روها را نیز دارد. اغلب دقت این نقشه ها از نظر ارتفاعی حدود ۴ تا ۵ متر است و لذا برای طراحی سیستم های تحت فشار تامین و انتقال آب خام فضای سبز شهرداری ها مناسب است [4]. با این وجود جهت طراحی نقشه های اجرایی تحت شرایط ثقلی، باید نقشه های ۱:۲۰۰۰ یا دقیق تر با عملیات نقشه برداری تهیه شود. اطلاعات فیزیوگرافی برای مناطقی که داده رواناب و رگبار نباشد نیز مفید است زیرا می تون به کمک تعمیم نتایج مدلسازی از حوضه های مشابه دارای آمار، به منظور انتقال اطلاعات استفاده و مشخصات رواناب و رگبار حوضه فاقد آمار را برآورد نمود.

به طور کلی عمده اطلاعات حوضه شهری می تواند از نقشه های DEM، کاربری، خاک، زمین شناسی، و عکس های هوایی (یا تصاویر ماهواره) استخراج و مدل مفهومی از پارامترهای زیر طراحی شود:

- مساحت زهکشی

- درصد مناطق نفوذناپذیر از کل سطح زهکشی

- درصد مناطق نفوذناپذیر موثر. منظور مناطق نفوذناپذیر متصل به یکدیگر و متصل به سیستم سیلاب رو و فاضلاب و دیگر انتقال دهنده ها می باشد.

- شیب متوسط حوضه (۵۰٪) و شیب (۱۰ و ۸۵ درصد). شیب ۱۰ و ۸۵ درصد شیب موثر اصلی در انتقال رواناب است. مقدار شیب متوسط در دو نقطه ۱۰ و ۸۵ درصد محاسبه می شود. شیب ۱۰ درصد معادل شیب در نقطه با فاصله مستقیم ۱۰ درصد از خروجی و شیب ۸۵ درصد معادل شیب در نقطه با فاصله مستقیم ۸۵ درصد از خروجی است.

- نفوذپذیری در افق A لایه خاک (سانتی متر بر ساعت)

- متوسط ظرفیت رطوبت خاک افق های A, B, C و سایر اطلاعات فیزیک خاک

- PH آب خاک در لایه A و ...

- تعیین گروه های هیدرولوژیکی خاک و..

- تراکم خیابان ها (متر بر مترمربع سطح زهکشی)

- تراکم جمعیت (شخص بر متر مربع)

- کاربری به تفکیک درصد هر یک از کاربری های موجود

- برآورد نگهداشت موقت و دائم سطح حوضه به کمک روابط تجربی و بازدید میدانی [1]

- سطوح بالای جمع کننده ها شامل درصد ذخایر نگهداشت

- درصد مساحت بالای هریک از سیستم زهکش های سیلاب رو و غیرو

- درصد خیابان های با جوی و جمع کننده آب باران (Gutter)

- بارش سالانه و مقادیر بارش ساعتی با دوره بازگشت های بحرانی حوضه

- بار متوسط سالانه آلودگی در رواناب و باران و در هوای خشک (وزن به واحد سطح)

۱-۳-۲ واسنجی و مدلسازی زمان تمرکز

مدت زمانی (t_c) که آب از دورترین نقطه هیدرولیکی (L) (از نظر هندسی همیشه این زمان تمرکز به دست نمی آید) خود را به ورودی جمع کننده می رساند، زمان تمرکز حوضه می نامند که ممکن است با زمان تمرکز بحرانی برابر نباشد. زمان تمرکز بحرانی بیشترین سیل را ایجاد می کند. رسم خطوط هم زمان تمرکز (Isochrone) روی حوضه، می تواند دید مناسبی از زمان رسیدن و نقش قسمت های مختلف حوضه در توزیع زمانی تشکیل رواناب نشان دهد.

روش شناسی دلیری در خصوص محاسبه زمان تمرکز حوضه های شهری و روستایی به طور مفصل در مرجع ۱ ارائه شده است. در این خصوص برای حوضه های شهری کار کمی راحت تر می شود. زیرا عمده سیستم های شهری از قوانین هیدرولیک پیروی کرده و قطعیت بیشتری نیز دارند. در این خصوص زمان سفر (t) یک قطره آب می تواند از نسبت فاصله حرکت جریان (L) به سرعت جریان (V) به دست آید ($t_c = L/V$). در صورتیکه بازه های همگن بیش از یک مورد باشند می بایست زمان هر بازه همگن محاسبه و زمان تمرکز کل حوضه از جمع زمان سفر بازه های همگن حساب شود. در رابطه بالا فاصله مشخص است. برای تعیین زمان تمرکز هر بازه همگن می بایست سرعت را در بازه همگن از روش های زیر به دست آورد:

-اندازه گیری مستقیم میدانی (استفاده از مولینه)

-برآورد میدانی (استفاده از جسم شناور)

-معادلات هیدرولیکی لوله و کانال و جریان روزمینی (بند رونديابی و بند های طراحی)

-جداول تجربی (جدول ۱) یا جدول سرعت متوسط SCS در مدل TR55 شهری با احتیاط در کنار برآورد و کنترل میدانی.

- آنالیز هیدروگراف (بند محاسبات رواناب)

پس از تعیین سرعت از روش های بالا برای N بازه غیر همگن، می توان زمان سفر یا زمان تمرکز کل بازه (t_c) را از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$t_c = \sum_{n=1}^N L/V$$

لازم به ذکر است که برای محاسبه درست فاصله L می بایست ابتدا چند مسیر هندسی انتخاب و از نظر هیدرولیکی نیز کنترل شود. الزاما" این مسیرها طولانی ترین نیستند. هدف انتخاب طولانی ترین مسیر هیدرولیکی است. در انتها مقدار واقعی زمان تمرکز با آزمون و خطا در روش یا مدل محاسبه رواناب (بند محاسبات رواناب و مدیریت رواناب) مشخص می شود زیرا باید منجر به بیشترین دبی شود تا زمان بحرانی (t_{cr}) که متناسب با زمان تمرکز واقعی یا زمان تعادل (t_e) است به دست آید [1]. در صورتیکه اطلاعات میدانی یا امکان استفاده از روش های بالا در حوضه شهری مورد مطالعه نبود، می توان به کمک روش های تجربی زمان تمرکز حوضه های شهری که در ادامه معرفی شده اند، ابتدا روابط تجربی را کنترل و در صورت نیاز به کمک روش های بالا واسنجی نمود، سپس زمان تمرکز حوضه فاقد آمار را با روش تجربی واسنجی شده محاسبه کرد.

همچنین می توان روش تجربی مختص هر منطقه را برای حوضه شهری توسعه داد. جزئیات روش شناسی واسنجی و توسعه روابط جدید زمان تمرکز در هر منطقه توسط مولفین در مرجع ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: تقریب سرعت (ft/s) در بازه های همگن مختلف جهت برآورد زمان تمرکز [3]

Description of water course	Slope in percent			
	0-3	4-7	8-11	12-
Unconcentrated*				
Woodlands	0-1.5	1.5- 2.5	2.5- 3.25	3.25-
Pastures	0-2.5	2.5- 3.5	3.5- 4.25	4.25-
Cultivated	0-3.0	3.0- 4.5	4.5- 5.5	5.5-
Pavements	0-8.5	8.5-13.5	13.5-17	17-
Concentrated**				
Outlet channel—determine velocity by Manning's formula				
Natural channel not well defined	0-2	2-4	4-7	7-

معرفی روش های تجربی زمان تمرکز حوضه های شهری

روش های تجربی خاص منطقه توسعه خود هستند و نباید بدون واسنجی و روش شناسی بالا از آنها استفاده نمود. یکی از روش های معروف روش کریچ (۱۹۸۲) است که دلیل معروف شدن این رابطه تنها سادگی است و نه نتایج منطقی آن. حتی این روش مختص مناطق روستایی با شیب تند و شبکه توسعه یافته از رودخانه ها است که در آن توسعه داده شده است ولی در آن مناطق نیز همیشه قابل اطمینان نیست. لذا این روش در اینجا ارائه نمی شود. در ادامه ۳ روش که یک مورد (روش جنبشی) با پایه فیزیکی و مورد دیگر (روش SCS, 1985) با مبنای هیدرولیکی معرفی می شود. همچنین روش تجربی اداره هوانوردی فدرال (۱۹۷۰) با ذکر شرایط توسعه آن ارائه می شود تا در مطالعات اولیه بتوان یک برآوردی تقریبی از زمان تمرکز حوضه شهری داشت.

به طور کلی همانطور که در بالا نیز ذکر شد در حوضه های شهری و محاسبات هیدرولوژیکی یا هیدرولیکی ابتدا باید جریان های همگن هیدرولیکی شناسایی و تفکیک شده و زمان تمرکز کل سیستم از جمع آنها به دست آید. در استفاده از روابط تجربی نیز همین گونه است. لذا ممکن است از دو یا سه رابطه تجربی مناسب هر یک از شرایط جریان برای سه بازه متفاوت استفاده و سپس جمع زمان تمرکز را برای کل سیستم برآورد نمود.

۱) روش سازمان هوانوردی فدرال (۱۹۷۰) مناسب زهکش فرودگاه و جریان روزمینی شهری

$$t_c = 1.8 (1.1 - C) L^{0.5} / S^{0.333}$$

C ضریب رابطه منطقی که در بند محاسبات رواناب ارائه شده است.

L طول جریان روزمینی یا زهکش (ft)

S شیب (%)

۲) روش SCS, 1985 توسعه یافته برای جریان کانالی، جریان روزمینی و جریان ورقه ای

در این روش برای جریان ورقه ای (Sheet flow) و جریان متمرکز کم عمق (Shallow) (حداکثر ۳۰۰ فوت پس از جریان ورقه ای تشکیل می شود-SCS,1985) و جریان کانالی (Channel) سه رابطه جهت محاسبه زمان سفر جریان هریک از حالت های فوق داده شده که از جمع آنها زمان تمرکز کل مسیر (t_c) به شرح زیر به دست می آید. در بند روندیابی در خصوص مبانی هیدرولیکی شرایط لامینار و آشفته جریان روزمینی و کانالی بیشتر صحبت شده است. در اینجا روش مذکور برای ۳ حالت جریان ورقه ای، جریان متمرکز کم عمق، جریان کانالی یا ترکیبی از این حالت ها توسعه یافته است.

زمان سفر جریان ورقه ای (بر حسب ساعت) (T_{sheet}):

$$T_{sheet} = \frac{C_f (nL)^{0.8}}{P_2^{0.5} S_0^{0.4}}$$

n ضریب زبری موثر مانینگ از جدول ۲، L طول مسیر (ft)، P_2 رگبار ۲ ساله ۲۴ ساعته (in)، S_0 شیب زمین (بی بعد)، و ضریب C_f برای سیستم U.S برابر ۰,۰۰۷.

زمان سفر جریان متمرکز کم عمق (ساعت) تا حداکثر ۳۰۰ فوت پس از جریان ورقه ای (T_{sheet}):

$$T_{shallow} = \frac{L}{3600V}$$

$$V = \omega S_0^{1/2}$$

L طول مسیر بر حسب فوت یا متر، سرعت متوسط (m/s یا fps).

ω برای سطح غیر سنگفرش ۱۶,۱ (fps) و ۴,۹۱ (m/s) و برای سطح سنگفرش ۲۰,۳ (fps) و ۶,۱۹ (m/s)

زمان سفر جریان کانالی ($T_{channel}$): با فرض جریان آشفته، نرمال و یکنواخت (شیب خط انرژی با شیب سطح آب و شیب کف بستر برابر است). از رابطه سرعت مانینگ داریم:

$$T_{channel} = L/V$$

$$V = \frac{k R_h^{2/3} S_0^{1/2}}{n}$$

k ضریب واحد (۱ برای سیستم متریک و ۱,۴۹ برای U.S)، R_h شعاع هیدرولیکی (m یا ft)، در اینجا n ضریب زبری مانینگ از جدول ۳. بدیهی است مشخصات شعاع هیدرولیکی (نسبت سطح مقطع جریان به محیط خیس شده) در مقطع پر کانال (Bank full) و جریان حد بالا (High water) حساب می شود.

زمان تمرکز کل مسیر با روش SCS,1985:

$$t_c = T_{\text{sheet}} + T_{\text{shallow}} + T_{\text{channel}}$$

اگر در مسیر، لوله های جمع آوری نیز باشد کافیت سرعت جریان در لوله (جریان تحت فشار یا آزاد که اغلب جریان آزاد طراحی می شود) محاسبه و سپس باتوجه به طول مسیر، زمان تمرکز این بازه نیز محاسبه و در رابطه بالا قرار گیرد. این موضوع چون در طراحی زهکش و جمع کننده های این کتاب تشریح شده در اینجا تکرار نشده است.

جدول ۲: ضریب زبری موثر مانینگ برای محاسبه سرعت جریان روزمینی [6]

Surface type	n value
Concrete	0.01–0.013
Asphalt	0.01–0.015
Bare sand	0.01–0.016
Graveled surface	0.012–0.3
Bare clay-loam (eroded)	0.012–0.033
Fallow, no residue	0.008–0.012
Conventional tillage, no residue	0.06–0.12
Conventional tillage, with residue	0.16–0.22
Chisel plow, no residue	0.06–0.12
Chisel plow, with residue	0.10–0.16
Fall disking, with residue	0.30–0.50
No till, no residue	0.04–0.10
No till (20–40% residue cover)	0.07–0.17
No till (60–100% residue cover)	0.17–0.47
Sparse vegetation	0.053–0.13
Short grass prairie	0.10–0.20

Source: Akan (1985), with permission ASCE.

جدول ۳: ضریب زبری مانینگ (n)* - Brown et al., 1996

Channel material	Depth range		
	0–0.15 m (0–0.5 ft)	0.15–0.60 m (0.5–2.0 ft)	>0.60 m (>2.0 ft)
Concrete	0.015	0.013	0.013
Grouted riprap	0.040	0.030	0.028
Soil cement	0.025	0.022	0.020
Asphalt	0.018	0.016	0.016
Bare soil	0.023	0.020	0.020
Rock cut	0.045	0.035	0.025

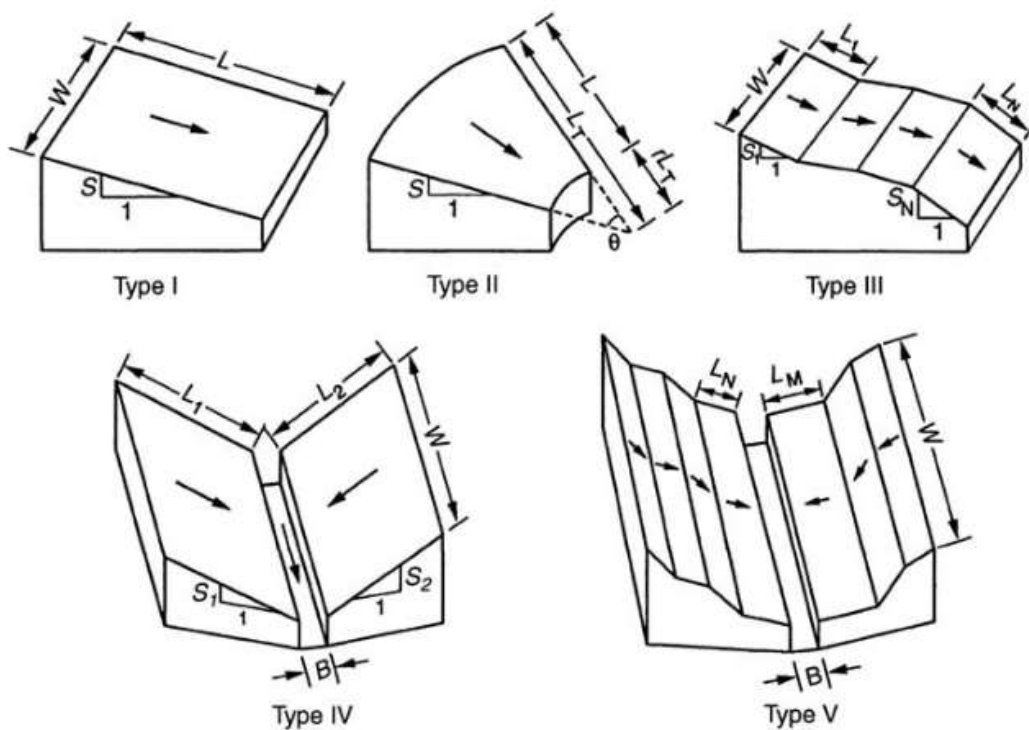
Source: Adapted from Brown et al. (1996).

*مقدار زبری با عمق جریان متغیر بوده و لذا مقدار آن ثابت نیست. ولی این تغییرات در جریان آشفته قابل چشم پوشی است. لذا استفاده از ضریب زبری مانینگ برای جریان شرایط آشفته اشکال ندارد.

۳) روش زمان تمرکز جنبشی (Morgali and Linsley, 1965)

در این روش هدف محاسبه زمان تعادل (t_e) اجزای مجزای سیستم (در اینجا جریان کانالی و جریان روزمینی) برای یک شدت رگبار ثابت i برای سطوح نفوذناپذیر با جریان کانالی و روزمینی توام است. این زمان تعادل معادل زمان تمرکز است و در روش آنالیز هیدروگراف رواناب به صورت یک خط موازی با محور طول ها برای یک بارش مازاد ثابت مشخص می شود. لذا می توان از روش های آنالیز هیدروگراف نیز به این مقدار رسید.

روش زمان تمرکز جنبشی مذکور، توسط Akan, 1985 برای شکل های مختلف حوضه شهری با سطح نفوذپذیر بر اساس معادله نفوذ گرین-آمپت (بند بارش مازاد) اصلاح شد (شکل ۶). بر این اساس پنج رابطه برای سطح نفوذناپذیر و یک رابطه برای سطح نفوذپذیر به دست آمد [6].



شکل ۶: تقریب شکل حوضه های مختلف شهر در روش زمان جنبشی (Akan, 1985, ASCE)

این صفحه خالیست



فصل ۲ آنالیز رگبار-رواناب

۲-۱ رگبار طرح

قبل از تعیین مقادیر بارش می بایست دوره بازگشت (T) سیلاب متناسب با ریسک خسارت قابل قبول محاسبه شود. حد بالای دوره بازگشت در مناطق شهری توسعه یافته توسط محدودیت های فیزیکی فضای در اختیار و مسائل فنی-اقتصادی تعیین می شود اما عواملی چون نارضایتی مردم در اثر آبگرفتگی، احساس نگرانی ایمنی، خسارت سیل، اهمیت سازه و عواقب شکست نیز موثر است. به طور کلی در گام اول می توان از روش تجربی جدول ۴ (دلیری ۱۳۹۴) در کنار روابط ریسک ساده تجربی بهره برد. سپس با توجه به فضای در اختیار اجرای تاسیسات و آنالیز هزینه - سود [1] به شکل زیر جهت تعیین دوره بازگشت (T) بهره گرفت.

در محاسبات سیلاب همیشه عدم قطعیت های ذاتی همچون رخداد سیل با احتمال وقوع پایین تر از عمر پروژه وجود دارد. این نوع ریسک ذاتی ممکن است از رابطه زیر محاسبه شود:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - RISK)^{\frac{1}{n}}}$$

مثال: اگر عمر مفید سازه ای ۵۰ سال (n) و خطر مجاز شکست آن ۱۰ درصد باشد، دوره بازگشت آن

۴۷۵ سال خواهد بود. ح (T=1/P، احتمال وقوع P برابر عکس دوره بازگشت).

بدیهی است مقدار دبی طرح هیدرولوژیکی از رگبار طرح روش بالا می تواند برای طراحی استفاده شود. اما برای اطمینان لحاظ سایر عدم قطعیت ها (بند پیش بینی سیل) همچون خطای محاسبات، اثر

گیر کردن آت و آشغال در مسیر سازه ها، و.. لازم است ضریب اصلاح فاکتور ایمنی در طراحی سازه یا دبی سیل همانطور که در مرجع ۱ تشریح شده لحاظ شود.

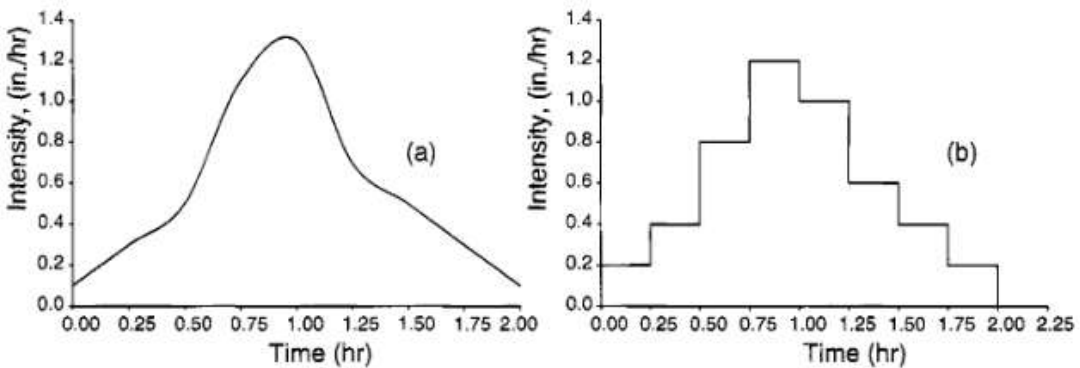
جدول ۴: دوره های بازگشت تجربی جهت سازه های کنترل سیل و برنامه های مدیریتی-دلیری ۱۳۹۴ (T=years)

ELV	T	سازه و سایر عملیات
-	۲-۵	بند خشکه چین تا ۳ متر، بند سبک فلزی و چوبی، سنگ چین ملات دار، گاتر خیابان و...
-	۵-۱۰	چکدم ۶ متر (بتونی-وزنی، گابیون، ریپ رپ و..)
-	۲۰۰-۲۰۰۰*	طرح های مهندسی رودخانه و مهار سیلاب در شرایط مختلف:
-	۵۰-۲۵ (۵۰)	اراضی کشاورزی و بدون خطر جانی (خطر جانی)
-	۱۰۰-۲۵ (۵۰)	مناطق شهری کوچک: اراضی مسکونی، تجاری بدون خطر جانی یا احتمال کم (خطر جانی)
-	۵۰۰-۲۵ (۵۰)	مناطق شهری بزرگ: اراضی صنعتی بدون خطر جانی یا احتمال کم (خطر جانی)
-	۲۰۰	ساماندهی رودخانه
-	۱۰۰-۲۵	تثبیت بستر و سواحل
-	۲-۱۰	رودخانه های کوچک کم اهمیت، مراتع و جنگل های دامپروری
-	۵-۱۰۰	تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب، سدهای زیرزمینی، حوضچه های سیلاب شهری
-	۵-۱۰	کالورت و زهکش در بزرگراه ها و فرودگاه ها در مسیرهای کم ترافیک، خنک کننده، پل
-	۲۵-۱۰	تردد متوسط
-	۱۰۰-۵۰	تردد زیاد
-	۲-۲۵	زهکش و فاضلابروها در شهرهای کوچک
-	۲۵-۵۰	زهکش و فاضلابروها در شهرهای بزرگ
-	۵-۵۰	زهکش های سطحی و زیرزمینی در مناطق روستائی و زراعی شامل نهر، بای پس و ...
-	۲-۵۰	ایی، دایک و دیوارهای سیل بند بتنی در اطراف مناطق روستائی و کم خطر
-	۵۰-۲۰۰	در اطراف مناطق شهری و پرخطر
-	۱۰-۵۰	طراحی دهانه و ابعاد پل ها در مناطق کم اهمیت
-	۵۰-۱۰۰	در مناطق مهم
-	۵۰-۱۰۰	سرریز سدهای بدون احتمال خسارات جانی و کم خطر با ابعاد کوچک
-	۱۰۰*	با ابعاد متوسط
۵۰-٪۱۰۰	-	بزرگ
٪۵۰	۱۰۰*	سرریز سدهای با احتمال خسارات جانی و اهمیت متوسط با ابعاد کوچک
۵۰-٪۱۰۰	-	ابعاد متوسط
٪۱۰۰	-	بزرگ
۵۰-٪۱۰۰	-	سرریز سدهای با احتمال خسارات جانی و اهمیت زیاد با ابعاد کوچک
٪۱۰۰	-	ابعاد متوسط
٪۱۰۰	-	بزرگ

۲-۱-۱ مناطق با آمار و بدون آمار

سوالات کلیدی در اینجا تعیین ارتفاع رگبار، شدت (i)، و منحنی های شدت-مدت-فراوانی (IDF) و مشخصات توزیع زمان (تیپ رگبار)، توزیع مکان بارش (DAD)، و تداوم بارش (D) برای یک دوره بازگشت مشخص (رگبار طرح) می باشد. مقادیر مذکور ممکن است برای یک واقعه یا یک سری سالانه کوتاه مدت یا درزآمدت چند ساله با توجه به اهداف محاسبه شود. اغلب برای محاسبات و مدیریت رواناب آلوده یا کنترل حجم رواناب، محاسبات بیلان، توسعه سری زمانی بارش جهت شبیه سازی رواناب مصنوعی با مدل های درک فیزیکی (رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی و ..) کاربرد دارد.

در حوضه های با آمار مناسب و ایستگاه های سینوپتیک هواشناسی، امکان ترسیم شدت بارش (مثلاً "سانتی متر یا میلی متر بر ساعت) روی محور طول ها در مقابل زمان روی محور عرض ها می باشد. اسم این منحنی، هایتوگراف بارش می باشد که ممکن است به صورت هیستوگرام یا منحنی ترسیم شود (شکل ۷).



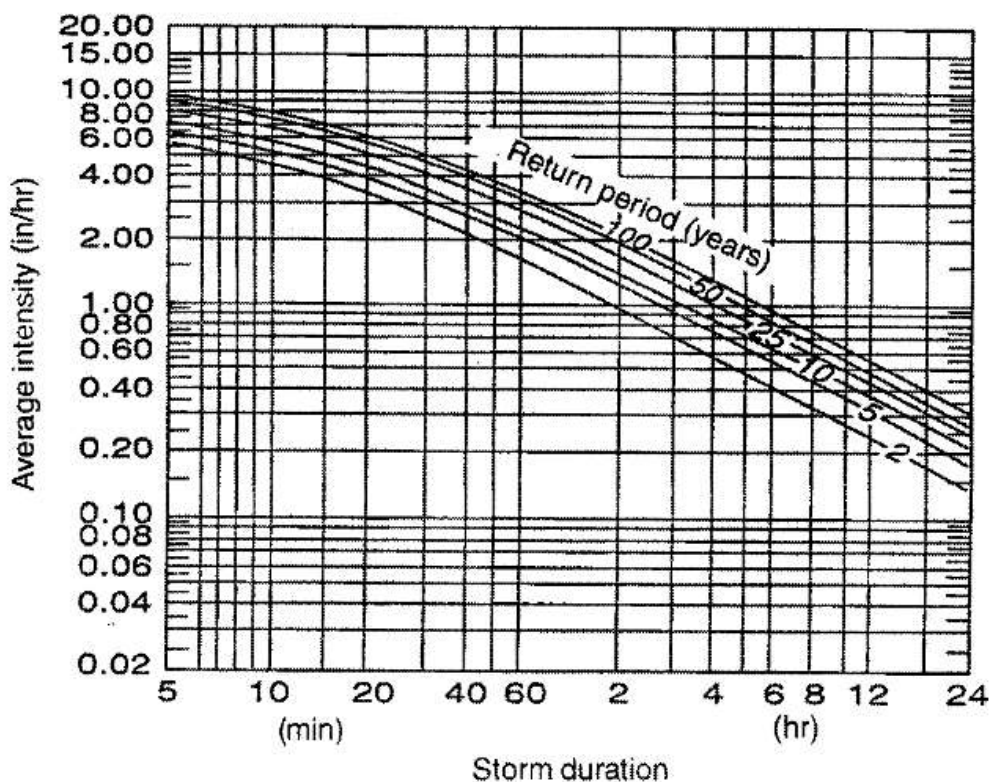
شکل ۷: هایتوگراف بارش

رابطه اصلی آنالیز فراوانی رگبار به شکل زیر می باشد که با توجه به روش های پردازش و انطباق، بهترین ضریب K محاسبه و مقدار بارش طرح یا بارش با دره بازگشت های مختلف برای تداوم مشخص تعیین می شود [1]. در مطالعات رواناب شهری تعیین تداوم بحرانی رگبار D_C مهم است.

$$P_T = P_M + K * S$$

P_T مقدار رگبار با دوره بازگشت مورد نظر، P_M مقدار متوسط رگبار در دوره ۳۰ ساله اخیر، K ضریب فراوانی و S انحراف از معیار سری منتخب. در اینجا تعیین ضریب فراوانی بسیار حیاتی است. به عنوان مثال ابتدا رگبارهای ۱۰ دقیقه با شدت های مختلف استخراج و از رابطه فراوانی بالا، دوره بازگشت های ۲ الی ۱۰۰ ساله محاسبه می شود. این کار برای تدام های مورد نظر بعدی مثلاً "۲۰ دقیقه تا ۲۴ ساعت نیز محاسبه و سپس منحنی IDF مانند شکل ۸ ترسیم می گردد. اغلب معادله روابط IDF نیز به صورت زیر برای یک دوره بازگشت مشخص می باشد.

$$i = \frac{A}{D + B}$$



شکل ۸: منحنی IDF منطقه ویرجیانا - ۱۹۸۰ از VDOT

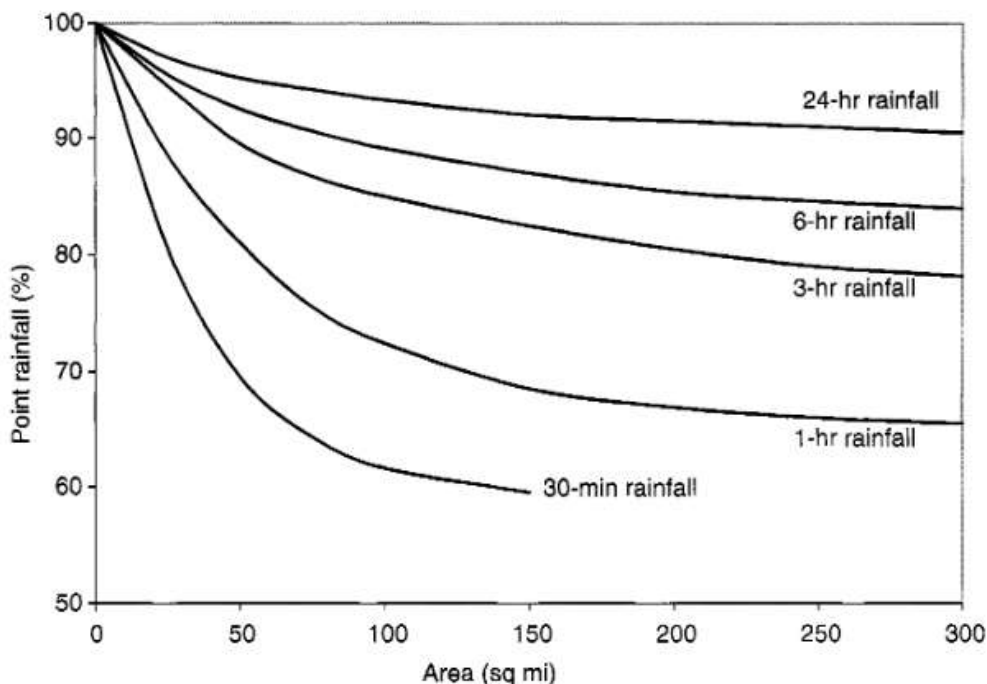
در رابطه بالا I شدت متوسط رگبار و D تداوم رگبار و A و B پارمترهای برازش معادله بوده که با روش حداقل مربعات تطابق منحنی محاسبه می شوند.

انتخاب تداوم رگبار طرح / تداوم بحرانی رگبار طرح (D_C)

انتخاب تداوم رگبار بستگی به ماهیت پروژه دارد. مثلاً "در پروژه های کنترل سیل و سازه های کالورت یا سیلاب رو، تداوم رگبار معادل زمانبست که بیشترین دبی پیک برای دوره بازگشت معین ایجاد شود. این زمان اغلب معادل زمان تمرکز هندسی نبوده و ممکن است معادل زمان تمرکز هیدرولیکی باشد (دلیری ۱۳۹۳). برای سازه های نگهداشت شهری، زمان تداوم زمانبست که بیشترین حجم نگهداشت ایجاد شود. در عمل می توان زمان بحرانی را با آزمون و خطا محاسبه کرد. سپس می توان از روی منحنی IDF و مشخص بودن زمان تداوم بحرانی و دوره بازگشت، ارتفاع و شدت رگبار طراح را تعیین نمود. .

توزیع مکانی رگبار (DAD)

وقتی یک ایستگاه در آنالیز رگبار استفاده شود و ایستگاه منتخب در مرکز ثقل حوضه یا احتمالاً "بارش باشد مقدار رگبار عموماً" زیادتر از مقدار متوسط پهنه ای برآورد می شود و اگر ایستگاه در حاشیه ها باشد مقدار رگبار کمتر برآورد می شود. لذا اصلاح مقدار رگبار برای ضریب افزایشی در پروژه های کنترل سیل اهمیت دارد. یک روش استفاده از روابط تجربی است که باتوجه به تداوم رگبار و سطح حوضه، مقدار ضریب اصلاحی را معین می کنند. روش مناسب دیگر ترسیم منحنی های عمق-سطح-تداوم (DAD) منطقه مطالعه از داده های ایستگاهی یا روابط تجربی واسنجی شده منطقه می باشد. البته هرچه حوضه بزرگتر باشد این غیریکنواختی بیشتر بوده و اهمیت وجود تراکم ایستگاه ها نیز بیشتر می شود. راه سوم استفاده از آنالیز آمار رگبار چندین ایستگاه در سطح حوضه می باشد. در حوضه های شهری باتوجه به کوچک بودن سطح، اغلب اصلاح فاکتور کاهشی نیاز نمی شود (شکل ۹).



شکل ۹: منحنی ضرائب کاهششی اصلاح توزیع مکانی رگبار یک ایستگاه در مرکز ثقل بارش [6]

توزیع زمانی رگبار / تیپ رگبار (TDP)

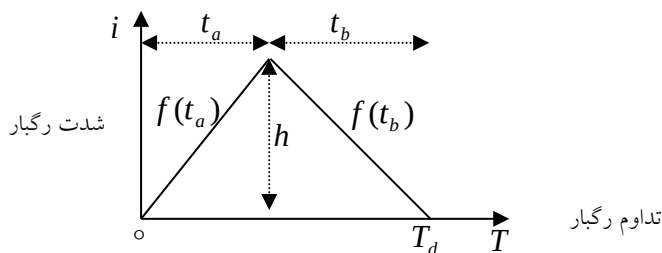
اگر ارتفاع رگبار جزء مثلاً "رگبار ۶ ساعته با دوره بازگشت T به صورت تجمعی نسبت به ارتفاع کل رگبار روی محور طول بی بعد شود (رگبار کل / رگبار جز Σ) و در برابر زمان رسم شود، منحنی تیپ رگبار ۶ ساعته با دوره بازگشت T این منطقه فرضی طراحی می شود. شکل این منحنی S شکل می باشد. البته ممکن است تحلیل چندین سری رگبار ۶ ساعته در یک منطقه شکل های مختلف ایجاد کند ولی شکل بی بعد متوسط این سری ها اغلب یک روند کلی خواهد داشت. تیپ رگبار در واقع اثر توزیع زمانی شدت بارش را روی مولفه های تشکیل رواناب القا می کند. مثلاً "رگباری که ابتدا شدید باشد باعث کند شدن سریع تر نفوذ خاک نسبت به رگبار با آغاز شدت کم در خاک های ریز بافت دارد. البته ممکن است در خاک درشت چنین اثری مهم نباشد ولی بازهم می تواند روی مشخصات شیب هیدروگراف رواناب از نظر سرعت صعود اثر بگذارد. در مدلسازی بارش - رواناب

با روش SCS اغلب کارشناسان ایران از تیپ های فرض شده این روش (روش SCS چهار تیپ طراحی کرده که برای بارش های ۲۴ ساعته و کمتر در حوضه های کوچک و بزرگ قابل استفاده است) که برای شرایط ایالات امریکا توسعه یافته اند استفاده می کنند که هم در حوضه های روستایی و شهری نتایج غیر قابل اعتماد از مقدار دبی سیل ایجاد می کند (دلیری، ۱۳۸۸). لذا باید این منحنی های تیپ برای هر منطقه تهیه و وارد مدل یا محاسبات دستی شود. با این وجود تیپ ۲ این روش ممکن است در برخی نقاط کشور مناسب باشد.

برای توسعه منحنی تیپ رگبار در حوضه هایی که فاقد آمار ثبت شده هستند روش های مختلفی توسعه داده شده است. یک روش انتقال نتایج ایستگاه معرف به منطقه است. روش های عمده تجربی طراحی تیپ رگبار شامل روش سرویس حفاظت خاک منابع طبیعی امریکا (SCS)، روش هاف، روش های توگراف مصنوعی، روش Yen & Chow, 1988 یا روش های توگراف مثلی و روش چیکاگو می باشد.

روش های توگراف مثلی ین و چو، ۱۹۸۸

روش های توگراف مثلی یک روش ساده جهت آنالیز رگبار و بررسی توزیع زمانی آن با تداوم های مختلف است. جهت ترسیم های توگراف رگبار پس از مشخص کردن تداوم مورد نظر T و ارتفاع رگبار P در مثلث زیر می بایست مقدار ضریب پیشرفت رگبار (I) را در هر منطقه بر اساس آنالیز یکسری از رگبارهای با تداوم مشخص محاسبه نمود.



های توگراف مثلی (Chow, Applied hydrology, 1988)

بدیهی است اگر تداوم رگبارها ثابت باشد ضریب محاسبه شده مختص همان تداوم است؛ اما اگر برای رگبارهای مختلف محاسبه شود، بهتر است برای هر تداوم توزیع زمانی حساب شود ولی عموماً

مقدار متوسط آن برای تداوم‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. مقدار P در هایتوگراف مثلثی چو معادل سطح زیر مثلث است؛ لذا:

$$P = \frac{hT_d}{2} \rightarrow h = \frac{2P}{T_d}$$

ضریب پیشرفت رگبار معادل نسبت زمان تا اوج رگبار t_a به تداوم کل بارش T_d برابر رابطه زیر است:

$$r = \frac{t_a}{T_d}$$

بر این اساس زمان فروکش رگبار t_b از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_b = T_d - t_a = (1-r)T_d$$

بر اساس مطالعات صورت گرفته مقدار r در بسیاری از نقاط دنیا مانند هند، کانادا و ایالت‌های مختلف امریکا کمتر از ۰,۵ و بین ۰,۳۲۵ تا ۰,۴۸ به دست آمده است. در این خصوص محقانی چون آقای Yen & Chow, 1980 با آنالیز ۹۸۶۹ رگبار در ۴ ایالت مختلف امریکا نتیجه گرفتند که شکل هایتوگراف‌های مثلثی برای بیشتر بارش‌های سنگین تقریباً یکسان است و تنها عواملی چون تداوم بارش، خطای اندازه‌گیری و موقعیت جغرافیایی می‌تواند تاثیر جزئی در آن داشته باشد.

مثال: جهت طراحی سیستم زهکشی سیلاب در یک شهر نیاز به طراحی هایتوگراف رگباری با دوره بازگشت ۵ سال است. زمان بحرانی طراحی سیستم ۱۵ دقیقه و مقدار r بر اساس آنالیز ایستگاه‌های معرف منطقه ۰,۳۸ به دست آمده است. در صورتی که مقدار رگبار ۵ ساله با تداوم ۱۵ دقیقه برابر ۱,۰۷ اینچ باشد، اجزای هایتوگراف مثلثی رگبار طرح را در سیستم متریک محاسبه کنید؟
ابتدا شدت اوج h را محاسبه می‌کنیم:

$$h = \frac{2 * 1.07 * 2.54}{0.25} = 21.74 \text{ cm/h}$$

$$t_a = 0.38 * 0.25 = 5.7 \text{ min}$$

$$t_b = (1 - 0.38) * 0.25 = 9.3 \text{ min}$$

با توجه به مختصات نقاط مذکور می‌توان هایتوگراف طرح را ترسیم و سپس منحنی تیپ رگبار را آنطور که مدل نیاز دارد وارد مدل‌هایی چون HEC-HMS نمود. برخی از منحنی‌های تیپ رگبار در هر دو بعد رگبار و زمان بی‌بعد شدند و برخی فقط بعد رگبار را بی‌بعد کردند. در این گام کلیه مشخصات رگبار طرح محاسبه شده است. اگر مقدار رگبار واقعه و سایر پارامترهای مبدل، وارد مدل بارش - رواناب شود، رواناب طرح محاسبه می‌شود. در حوضه‌های فاقد آمار می‌توان بارش طرح حوضه معرف را مانند روش‌های مذکور محاسبه و به حوضه فاقد آمار منتقل کرد. در این حالت می‌توان سری زمانی بارش را نیز تولید و سپس سری زمانی رواناب را با مدل‌های شبیه سازی تهیه و آنالیز فراوانی را روی سری رواناب اعمال کرد. بدیهی است می‌توان حجم رواناب را نیز به کمک آنالیز هیدروگراف واحد محاسبه نمود.

۲-۲ هیدرولوژی رگبار

با توجه به شماتیک مدل مفهومی بند ۱-۲-۱ محاسبات بارش مازاد و رواناب در یک حوضه شهری ممکن است در نقطه خروجی حوضه (Watershed outlet) یا نقطه طراحی (Design point) به صورت کلی مد نظر باشد و یا محاسبات تک تک اجزای سیستم شهر مثلاً "جاده ای خاص، پشت بام‌ها، بالادست یک جمع کننده باران یا حوضه یک سیلاب رو خاص به صورت مجزا مورد نظر باشد. در حال اول که نیاز به محاسبات در کل سطح حوضه است، از روش‌های غیر توزیعی (Lumped) و یا به اصطلاح گرده ای در مکان مانند روش SCS یا روش منطقی یا هیدروگراف واحد (UH) که در ادامه تشریح شده اند استفاده می‌شود. و لذا منطقی نیست محاسبات هر یک از اجزای سیستم را وارد یک مدل توزیعی نمود و یا به صورت مجزا محاسبه و ترکیب کرد. زیرا می‌توان اثر هر کلیه اجزا را در مدل‌های ساده گرده ای هیدرولوژیکی با یک چند پارامتر واسنجی شده وارد و محاسبات رواناب را انجام داد.

در حالت دوم ممکن است نیاز به رواناب - دبی - عمق و سرعت جریان در تک تک اجزای خاص مثلاً "یک فرودگاه یا مسیر جاده بالادست کالورت ها باشیم. در این حالت جریان از نوع جریان روزمینی (Overlanflow) یا ترکیب با جریان کانالی می‌باشد. جریان حاشیه زهکش خیابان ها نیز

از نوع جریان کانالی بوده و اساس هیدرولیک هر دو جریان از نوع کانال های روباز آزاد است. در این حالت روابط هیدرولیکی در شرایط دائم یا غیر دائم، یکنواخت یا غیر یکنواخت و اغلب از نوع جریان آشفته با توجه به رژیم و شرایط جریان برای مناطق شهری استفاده می شود. این موارد به تفصیل در مرجع ۱ توسط مولف ارائه شده است ولی در این کتاب با مفاهیم ساده تر و مثال های متفاوت مجدداً در بخش محاسبات رواناب و روندیابی ارائه می شود.

۲-۲-۱ محاسبه بارش مازاد

در قسمت های پیش مقدار و مشخصات رگبار طرح مشخص شد. در این قسمت باید بررسی شود که چه مقدار از این بارش، به بارش مازاد تبدیل می شود. سپس در بند محاسبات رواناب، به کمک روش ها مبدل های مختلف می توان بارش مازاد را به مشخصات رواناب مانند دبی و حجم تبدیل نمود و در بند روندیابی نیز می توان این مشخصات را به نقاط مورد نظر به صورت هیدروگراف رواناب شامل اطلاعات عمق و سرعت و دبی و حجم منتقل کرد.

باید توجه کرد که انتخاب هر روش در تعیین بارش مازاد یا مقدار رواناب ممکن است از ساده تا پیچیده با توجه به دقت و فاز مطالعات انتخاب شود. مثلاً "روش های گرافیکی و ساده تبدیل بارش به بارش مازاد از روش شماره منحنی که در ادامه می آید صرفاً" برای مطالعات اولیه بوده و برای فاز طراحی باید از روش های مدلسازی عددی یا روش های آنالیز هیدروگراف در کنار روش های مناسب تجربی بهره برد. در مرجع ۱ بحث های مناسبی در خصوص محاسبات PMP، PMF و محاسبات جزئی رواناب شهری برای بزرگراه یا فرودگاه و یا سطح شهر به همراه مثال ارائه شده است.

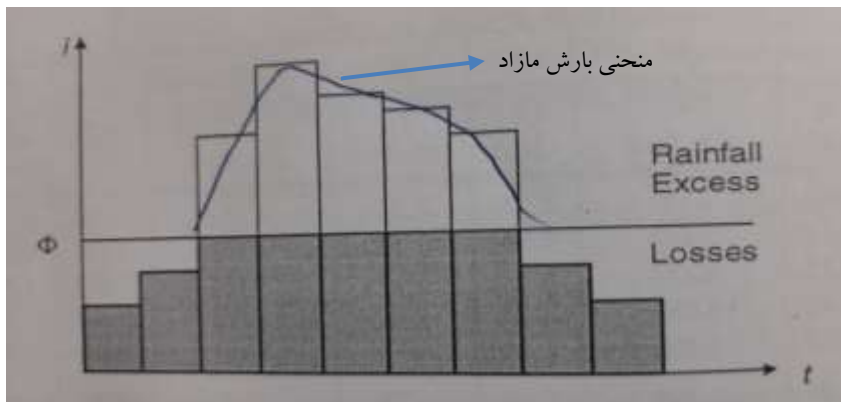
۱) روش شاخص ($\emptyset$)

در حوضه های شهری با توجه به وجود کاربری پارک و فضای سبز و زمین های خاکی و بایر، تلفات نفوذ (f)، و گیرش گیاهی (L) در طول یک رگبار کوتاه وجود دارد. پس از اتمام ظرفیت گیرش در یک رخداد بارش، فرایند تبخیر عمل می کند. لذا ممکن است در طول یک بارش، به دلیل دمای زیاد، بیش از یک بار ظرفیت گیرش وارد فرایند هیدرولوژیکی شود. در خصوص گیرش ساختمان ها هنوز تحقیقات مشخصی وجود ندارد ولی شاید بتوان از روی معادلات گیرش گیاهی، مقدار آن

را تخمین زد. تبخیر در فاصله زمانی کوتاه یک رگبار اهمیت ندارد ولی برای مدلسازی رواناب های بیش از چند روز تا سری سالانه باید مقادیر تبخیر نیز وارد محاسبات شود. ذخیره چالابی (D_s) در سطح نفوذ پذیر و نفوذناپذیر شهری وجود دارد ولی مقدار آن ناچیز است. مقدار بارش مازاد که متناسب با رواناب کل R هست، از رابطه زیر پس از کسر تلفات از بارش با دوره بازگشت P_T در گام های جزئی زمان متناظر هر مولفه تعیین می شود:

$$\text{Rainfall excess} = P_T - (f + L + D_s) \quad (\text{بارش مازاد برای یک دوره زمانی})$$

در صورتیکه کل تلفات ($f + L + D_s$) با علامت $\emptyset$ به صورت یک مقدار ثابت در زمان فرض شود، با فرض گرده ای بودن بارش روی سطح زهکشی، هیدروگراف رواناب به شکل زیر از هیستوگرام رگبار مازاد پس از ضرب محور عرض ها در مساحت زهکشی با رعایت واحدها و فواصل زمانی جزئی قابل محاسبه است. این فرض در مساحت های کوچک شهری و بارش یکنواخت در زمان و مکان قابل قبول است. روش تهیه هیدروگراف واحد در ادامه تشریح شده است. در روش هیدروگراف واحد کافیت مقدار بارش مازاد بر حسب ارتفاع را که از روش فوق محاسبه شده است در عرض های هیدروگراف واحد معرف حوضه با Δt متناسب با هایتوگراف رگبار، ضرب تا هیدروگراف رواناب رگبار مورد نظر محاسبه شود. در این حالت دبی رواناب، حجم رواناب و سایر مشخصه های زمانی رواناب برای روندیابی و طراحی کانال و مخازن نیز مهیا شده است.



شکل ۱۰: روش شاخص $\emptyset$ - منحنی بارش مازاد متناسب با هیدروگراف واحد Δt رواناب شهری ($UH_{\Delta t}$)

مقدار تلفات کل $\emptyset$ می تواند بر اساس آنالیز داده های ایستگاهی بارش - رواناب (جزئیات آنالیز ایستگاهی در مرجع ۱ توسط همین مولف ارائه شده است) و یا روش هایی که در ادامه ارائه شده با جمع تلفات جزئی محاسبه شود. این روش ممکن است در مناطق با کاربری بایر و خاکی قسمتی از شهر محاسبه شود و لذا در این حالت تنها نفوذ به عنوان تلفات در رواناب موثر می باشد که در این حالت تلفات شاخص معادل نفوذ نهایی یا ظرفیت نفوذ (f_c) بوده و سایر تلفات ناچیز می باشند.

مقدار تلفات ذخیره چالابی D_s

ذخیره چالابی در واقع بخشی از باران هست که روی چاله ها گیر افتاده و اگر سطح نفوذناپذیر باشد این مقدار ذخیره ثابت بوده و در نهایت تبخیر می شود. در سطح نفوذپذیر، در ابتدای بارش ابتدا سطح خاک به سمت اشباع شدن رفته و سپس به تدریج ذخیره چالاب تشکیل می گردد و این روند بستگی به نفوذ نهایی و بافت خاک دارد. ولی در نهایت از این آب ذخیره شده، بخشی نفوذ و بخشی تبخیر می شود. لذا مدلسازی ذخیره چالابی پیچیده بوده و اساساً هم ضرورتی ندارد زیرا مقدار آن ناچیز می باشد. بر اساس مطالعات (Wright-McLaughlin Engineers, 1969) مشخص شده مقدار تلفات ذخیره چالابی برای یک دوره رگبار می تواند به شکل زیر باشد:

- مناطق با سقف بدون شیب و جاده و سنگفرش وسیع حدود ۱ اینچ
- سقف های شیبدار حدود ۰,۵ اینچ
- فضای سبز چمن و گراس حدود ۰,۳ اینچ
- مناطق باز و خاکی شهری حدود ۰,۴ اینچ

مقدار تلفات گیرش گیاهی L

اگر فاصله بین دو بارش زیاد باشد بطوریکه درختان و سطح سازه ها خشک شده باشد، در هر بارش در ابتدای رگبار بخش کمی به صورت گیرش روی سطح برگ و ساقه ها می ماند و خیلی سریع این ظرفیت گیرش تکمیل می شود. مقدار این گیرش بستگی به تراکم تاج پوشش، شکل برگ ها و ساقه، شدت بارش و تیپ بارش (دلیری و خلقی، ۱۳۸۸) دارد و به طور کلی گیرش برای مدلسازی طولانی

مدت سالانه اهمیت دارد و لذا در رگبارهای شدید کوتاه تک رخداد، مقدار گیرش قابل چشم پوشی است.

روش تجربی هورتن (۱۹۱۹) و اصلاح شده آن توسط کیبلر (۱۹۹۶) و آرون (۱۹۹۲) مقدار گیرش L (اینچ) به کمک جدول ۵ و مقدار مشخص باران P برای دوره بازگشت مشخص برآورد می کنند.

$$L = a + P^n$$

$$L = cP^m$$

جدول ۵: مقادیر پارامترهای معادلات برآورد گیرش گیاهی (Kibler et al., 1996)

Tree type	Equation 3.1			Equation 3.2	
	a	b	n	c	m
Apple	0.04	0.18	1.0	0.25	0.73
Ash	0.015	0.23	1.0	0.26	0.88
Beech	0.02	0.23	1.0	0.21	0.65
Chestnut	0.04	0.20	1.0	0.30	0.77
Elm	0.0	0.23	0.5	0.15	0.48
Hemlock	0.0	0.20	0.5	0.32	0.74
Maple	0.03	0.23	1.0	0.29	0.77
Oak	0.03	0.22	1.0	0.24	0.66
Pine	0.0	0.20	0.5	0.30	0.70
Willow	0.02	0.40	1.0	0.43	0.85

Source: Kibler et al. (1996), used with permission, ASCE.

مقدار تلفات نفوذ f

در مناطق روستایی پارامتر نفوذ بسیار مهم است. با این وجود در مناطق شهری نیز مسئله نفوذ می تواند وارد محاسبات شود. به طور کلی بر اساس فیزیک خاک می دانیم که فرایند نفوذ خاک توسط ظرفیت نفوذ خاک (f_c) که نفوذ نهایی است کنترل می شود. همچنین در ابتدای بارش که خاک خشک است نفوذ بیشتر و به تدریج به مقدار نهایی نزدیک می شود. البته این موضوع در خاک های درشت و شنی ثابت است. لذا رطوبت اولیه خاک در محاسبه تلفات بسیار مهم است.

به عنوان مثال اگر خاک در ابتدای بارش اشباع باشد، بلافاصله شرایط ماندابی ایجاد می شود و لذا زمان ماندبی (pnding time) صفر است.

همچنین شدت رگبار می تواند سطح خاک را تخریب و باعث کاهش نفوذ خاک شود. این عدم قطعیت البته وارد محاسبات روش های موجود نشده است. همچنین فشار هد جریان روزمینی نیز دیده نشده و معادل فشار اتمسفر لحاظ شد و البته این موضوع خیلی مهم نیست زیرا عمق جریان روزمینی کم است. این خطاها می تواند با ترفندهای دیگر مثلاً "واسنجی یا آنالیز عدم قطعیت (بند پیش بینی سیل) مورد توجه قرار گیرد. در این خصوص رابطه ریچارد به صورت مشتقات جزئی یک بعدی به شکل زیر وجود دارد که حل عددی آن مربوط به این کتاب نمی شود.

معادله ریچارد برای نفوذ عمقی Z

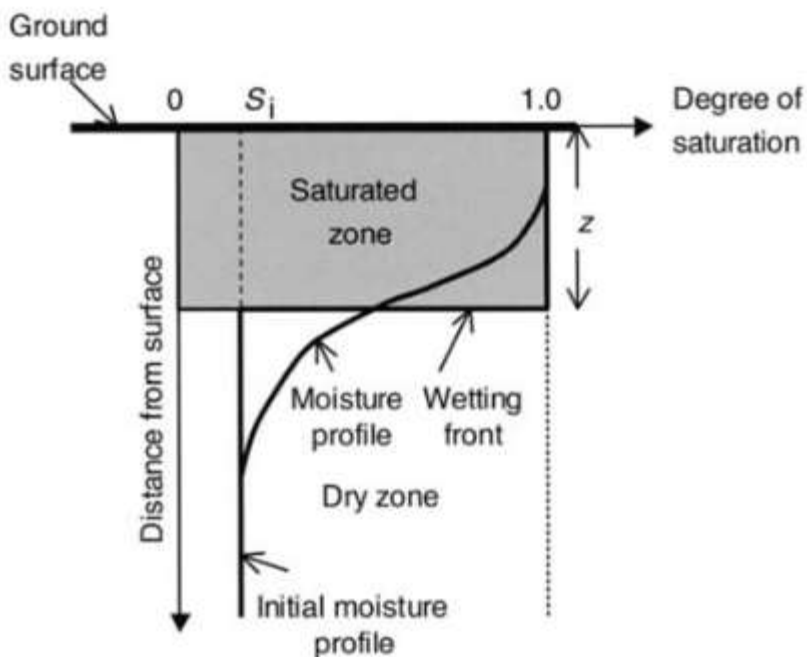
$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_s K_r \frac{\partial (z + p/\gamma)}{\partial z} \right] = \phi \frac{\partial S}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t}$$

روش های تحلیلی مختلفی مانند هورتن (۱۹۴۰)، هورتن اصلاح شده، هولتن و کوستیاکوف و فیلیپ (۱۹۷۵) وجود دارد. در این میان روش گرین و آمپت (Green and Ampt, 1911) یکی از روش های با پایه فیزیکی کامل و از نظر ابعادی همگن می باشد (شکل ۱۱).

روش گرین و آمپت در بسیاری از مدل ها از جمله HEC-HMS و مدل EPA-SWMM قرار دارد. برای توسعه این روش از معادله داری برای شرایط اشباع استفاده شده و همچنین زمان آغاز جمع شدن آب در چاله (Ponding time) به کمک پارمترهای هد مکش خاک، تخلخل موثر ($\emptyset$)، درجه اشباع (S)، مقدار رگبار (i)، هدایت هیدرولیکی نسبی و اشباع خاک، نسبت به سطح زمین (Z) استفاده شده است (شکل ۱۲).

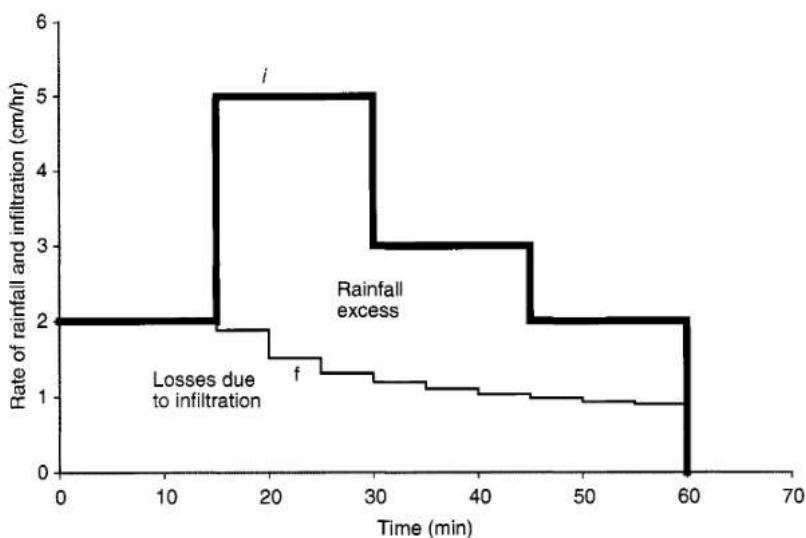
$$\Delta Z = f \Delta t / \emptyset (1 - S_i)$$

داده های روش فوق می بایست از روی نتایج نمونه گیری از واحدهای کاری خاک تهیه شود. البته می توان از روی جداول مشخصات خاک نیز در فازهای اولیه برای تقریب داده ها استفاده نمود.



شکل ۱۱: فرایند حرکت رطوبت خاک در مدل گرین و آمپت، ۱۹۱۱

لازم به ذکر است اگر ظرفیت نفوذ خاک (f_c) بیشتر از مقدار رگبار (i) باشد، مقدار نفوذ (f) برابر رگبار می شود و اگر ظرفیت نفوذ خاک کمتر از مقدار رگبار باشد مقدار نفوذ (f) برابر ظرفیت نفوذ خاک (f_c) می شود.



شکل ۱۲: مثال: محاسبه بارش مازاد با مدل گرین و آمپت، ۱۹۱۱

۲-۲-۲ محاسبه رواناب

در این گام اول باید یادآوری شود که مقدار رواناب را برای بارش مازاد در بالادست نقطه طراحی نیاز داریم. در حالت اول این سطح ممکن است ۱۰۰ متر جاده بالادست یک کالورت یا سطح زهکشی فرودگاه یا یک منطقه پارکینگ و یا محوطه تفریحی پارک داخل شهر باشد و یا ممکن است در حالت دوم کل زیر حوضه های سطح زهکشی شهر باشد. روش هایی که در این بند ارائه می شود خاص حالت دوم است یعنی کل زیرحوضه های یک شهر به صورت گرده ای و لذا اگر نیاز به محاسبه رواناب در یک قطعه کوچک باشد، روش های مناسب آنها در بند روندیابی و یا مرجع ۱ ارائه شده است. البته روش های بارش مازاد بند قبل، برای هر دو حالت صادق است. به طور کلی پس از محاسبه بارش مازاد می بایست با یک مدل مناسب بارش مازاد را به رواناب و سایر مشخصات رواناب در نقطه طراحی جهت محاسبات طراحی سیستم های جمع کننده تبدیل کرد. همچنین ممکن است وقتی این مشخصات در نقطه طراحی محاسبه شد، نیاز باشد تا این دبی و حجم سیل محاسبه شده در نقطه ای پایین تر مثلاً "در سایر منهول های نیز منتقل شود و با مشخصات سیل زیر حوضه دیگری ترکیب شود. این روش ها نیز در بند روندیابی ارائه شده است.

مبدل * بارش مازاد = مشخصات رواناب سطحی

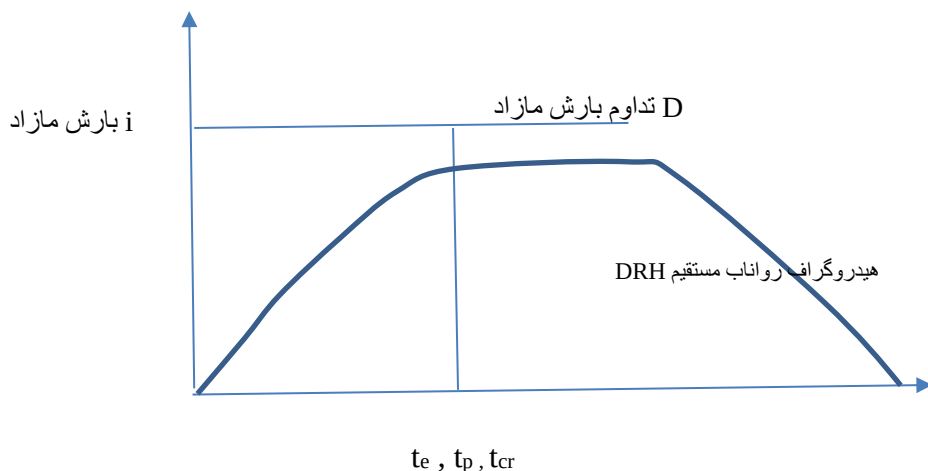
در ادامه روش های محاسبه مشخصات رواناب در سطح وسیع و به صورت کلی گرده ای ارائه می شود و برای محاسبه رواناب یک سطح مجزا مثلاً "جاده یا فرودگاه یا پشت بام ها به بند روندیابی مراجعه شود.

۱) روش هیدروگراف واحد

مفهوم هیدروگراف

روی یک حوضه فرضی، بارش مازاد با شدت ثابت i با توزیع یکنواخت و تداوم D در نظر بگیرید. شکل هیدروگراف رواناب مستقیم (DRH) به صورت شماتیک زیر خواهد شد. به طور کلی پاسخ

حوضه های شهری به صورت خطی می باشد. لذا استفاده فرضیات مفهوم هیدروگراف واحد می تواند برای حوضه های شهری مناسب باشد.



شماتیک هیدروگراف رواناب مستقیم یک حوضه شهری ناشی از رگبار مازاد یکنواخت با شدت ثابت و تداوم D

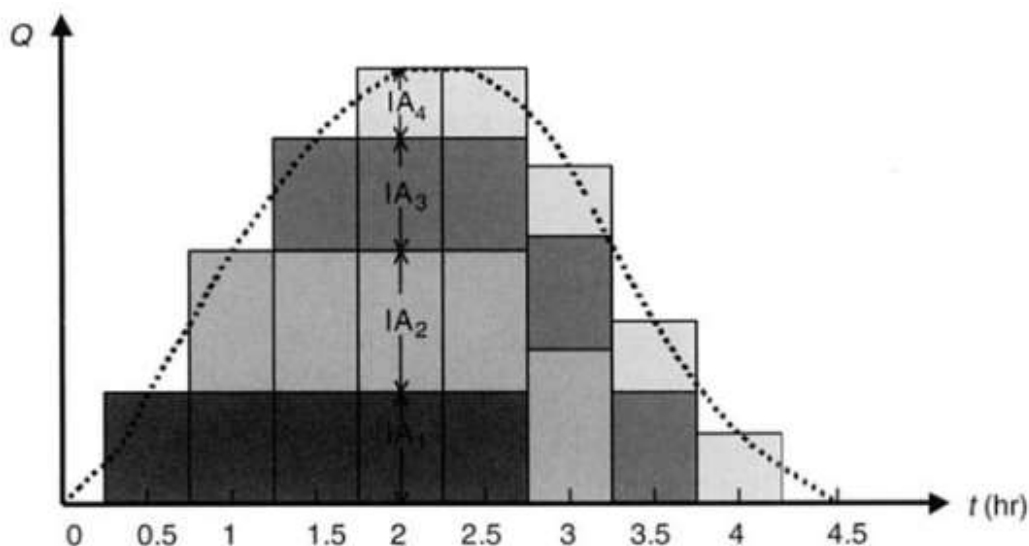
در شکل شماتیک بالا، مشخص است درست قبل از صاف شدن هیدروگراف سیل مقدار دبی به حداکثر رسیده است. این زمان که آغاز صاف شدن هیدروگراف است آغاز زمان تعادل (t_e) بوده که برابر زمان تمرکز (t_c) که در اینجا با آغاز زمان بحرانی (t_{cr}) نیز برابر است می باشد. اگر در طراحی حجم سیل نیز مهم باشد زمان بحرانی تا نقطه آغاز شاخه نزولی ادامه می یابد [1].

برای توسعه یک هیدروگراف شهری با فرض سطح نفوذپذیری صفر برای تمام سطح و ناچیز بودن کلیه تلفات روی یک سطح فرضی (شماتیک حوضه شهری بند ۱-۲-۱) فرض کنید کل حوضه از ۴ زیر حوضه $A1$ الی $A4$ تشکیل شده باشد. فاصله زمانی حوضه $A1$ نیز از نقطه طراحی (خروجی حوضه) ۰٫۵ ساعت فرض شود. سایر حوضه ها نیز با فاصله نیم ساعت از یکدیگر باشند. لذا زمان تمرکز حوضه معادل ۲ ساعت برای آخرین نقطه زیر حوضه آخر ($A4$) می شود. بدیهی است متوسط زمان سفر قطره آب برای هر زیر حوضه معادل متوسط حرکت آب از ابتدا و انتهای زیر حوضه می شود. مثلاً "برای زیر حوضه اول معادل ۰٫۲۵ ساعت و برای زیر حوضه دوم ۰٫۷۵ ساعت، زیر حوضه

سوم ۱,۲۵ و زیر حوضه چهارم ۱,۷۵ (h_r) می شود. حال با فرض یک بارش مازاد ۲ ساعته و یکنواخت (I) روی حوضه می خواهیم هیدروگراف سیل ناشی از این بارش مازاد را ترسیم کنیم. در جدول ۶ اجزای هیدروگراف سیل و در شکل ۱۳ هیدروگراف سیل این حوضه مشخص شده است.

جدول ۶ اجزای محاسبه شده رگبار مازاد روی سطح حوضه شهری مثال فرضی [6]

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Time (hr)	From subarea 1	From subarea 2	From subarea 3	From subarea 4	Total Runoff
0.25-0.75	$I A_1$	—	—	—	$I (A_1)$
0.75-1.25	$I A_1$	$I A_2$	—	—	$I (A_1 + A_2)$
1.25-1.75	$I A_1$	$I A_2$	$I A_3$	—	$I (A_1 + A_2 + A_3)$
1.75-2.25	$I A_1$	$I A_2$	$I A_3$	$I A_4$	$I (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)$
2.25-2.75	$I A_1$	$I A_2$	$I A_3$	$I A_4$	$I (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)$
2.75-3.25	—	$I A_2$	$I A_3$	$I A_4$	$I (A_2 + A_3 + A_4)$
3.25-3.75	—	—	$I A_3$	$I A_4$	$I (A_3 + A_4)$
3.75-4.25	—	—	—	$I A_4$	$I (A_4)$
4.25-4.75	—	—	—	—	—



شکل ۱۳: توسعه هیدروگراف از یک مثال فرضی - مفهوم مدل کلارک

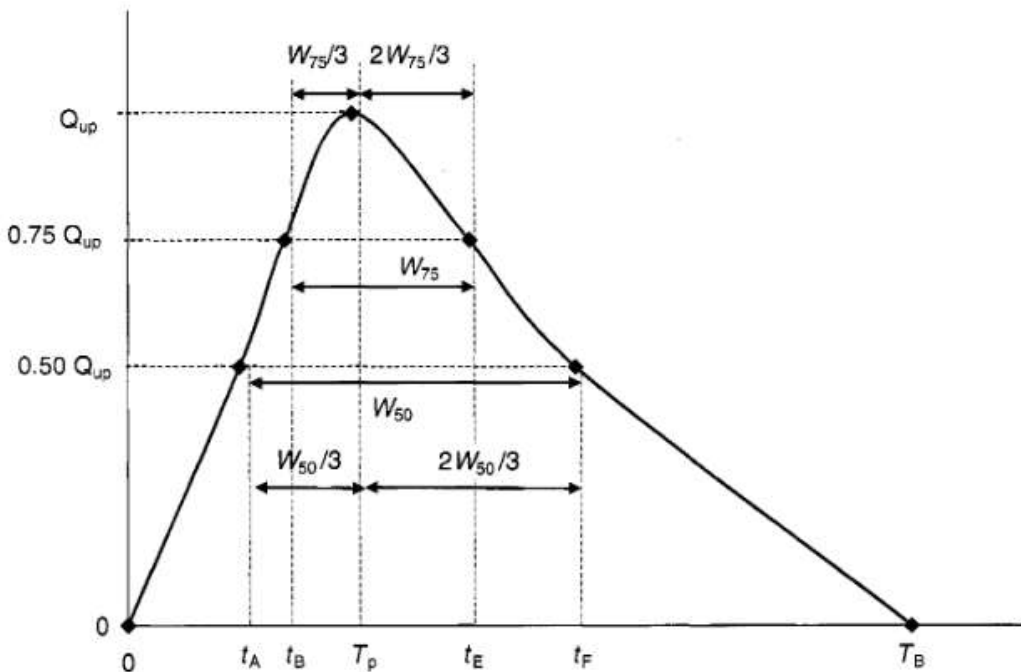
از شکل ۱۳ نیز مشخص است که اوج دبی پیک حدود ۲ ساعت پس از بارش مازاد رخ داده و مقداری تعادل نیز روی هیدروگراف ایجاد شده است. هر یک از هیستوگرام ها نیز معرف سهم حجم رواناب بخشی از زیرحوضه ها باتوجه به فاصله زمانی خود از خروجی حوضه هستند.

توسعه و مفهوم هیدروگراف واحد (Unit Hydrograph)

روش هیدروگراف واحد (UH) در واقع جهت محاسبه هیدروگراف رواناب مستقیم (DRH) از بارش مازاد یک رگبار مشخص کاربرد دارد. این روش اثر خصوصیات فیزیکی حوضه را به صورت غیر مستقیم و ترکیبی با مفهوم ریاضی وارد هیدروگراف می کند لذا در گروه روش های گرده ای (Lumped) قرار داد [1]. در واقع حاصل ضرب بارش مازاد در عرض های هیدروگراف واحد، هیدروگراف رواناب مستقیم می شود. هیدروگراف واحد دارای پایه زمانی است که معادل تداوم رگبار می باشد مثلاً "هیدروگراف واحد ۲ ساعته یعنی هیدروگرافی که دارای یک واحد رواناب یا بارش مازاد از رگبار مازاد ۲ ساعه است (UH₂). برای توسعه هیدروگراف واحد با هر پایه زمانی باید آمار بارش-رواناب یک حوضه معرف را همزمان برای پایه زمانی و مشخصات مورد نیاز طراحی، آنالیز نمود [1]. اگر چنین داده هایی پیدا نشود می توان از روش هایی که در ادامه ارائه شده است خصوصیات فیزیکی حوضه را به هیدروگراف واحد با پایه زمانی مورد نظر تبدیل نمود. روش های مختلفی مانند هیدروگراف واحد SCS، هیدروگراف تابع گاما، هیدروگراف مدل کلارک (مفهوم مدل کلارک - شکل ۱۳) و هیدروگراف اسپي وجود دارد. این روش ها اغلب در مدل هایی چون HEC-HMS و EPA-SWMM وارد شده اند. در ادامه توسعه و کاربرد روش اسپي که خاص حوضه های شهری است تشریح می شود.

- روش هیدروگراف ۱۰ دقیقه ای اسپي (Espey and Altman, 1978)

این روش جهت توسعه هیدروگراف واحد ۱۰ دقیقه ای حوضه های فاقد آمار و بر اساس آنالیز ۴۱ داده بارش-رواناب حوضه شهری در ۸ ایالات مختلف توسعه داده شده است. بر این اساس باتوجه به خصوصیات حوضه مورد نظر و معادلات زیر می توان شکل ۱۴ را تبدیل به هیدروگراف واحد ۱۰ دقیقه نمود.



شکل ۱۴: اجزای هیدروگراف واحد اسپپی (Espey and Altman, 1978)

در شکل ۱۴ واحد دبی بر حسب فوت مکعب بر ثانیه بر اینچ (cfs/in)، و زمان ها بر حسب دقیقه.

پارامترهای حوضه مورد نیاز روش اسپپی:

L طول کانال اصلی از نقطه طراحی تا دورترین فاصله هندسی (ft)

S شیب متوسط کانال اصلی

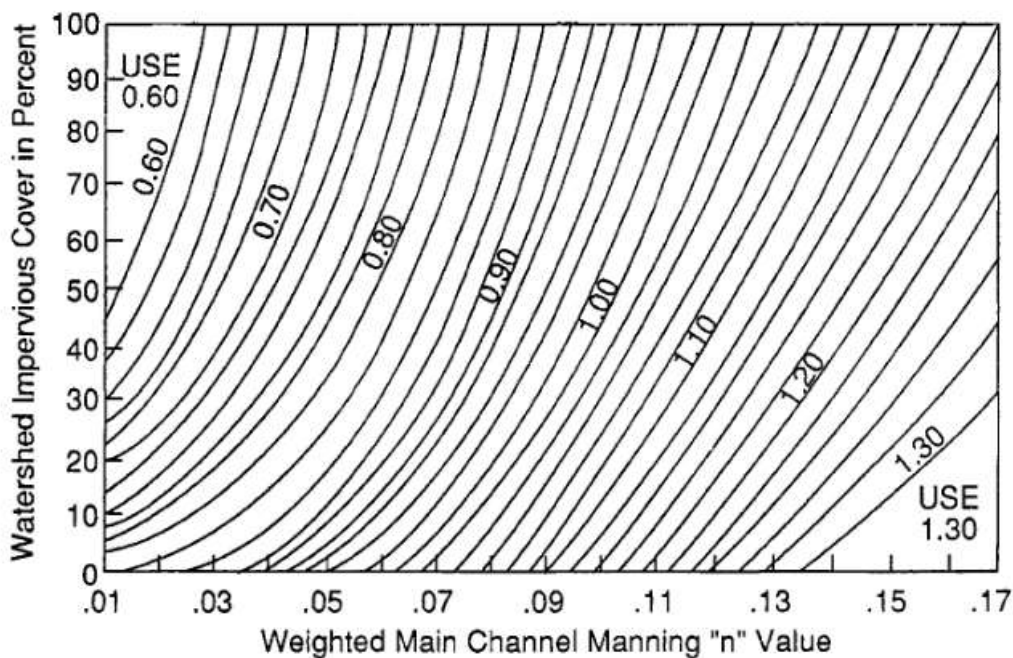
H اختلاف ارتفاع کف کانال از نقطه طراحی تا نقطه ۸۰ درصدی از نقطه طراحی (ft)

A مساحت زهکشی (sq mi)

I درصد مساحت نفوذپذیر (%)

n ضریب زبری مانینگ در کانال اصلی

$\emptyset$ فاکتور انتقال بی بعد از شکل ۱۵

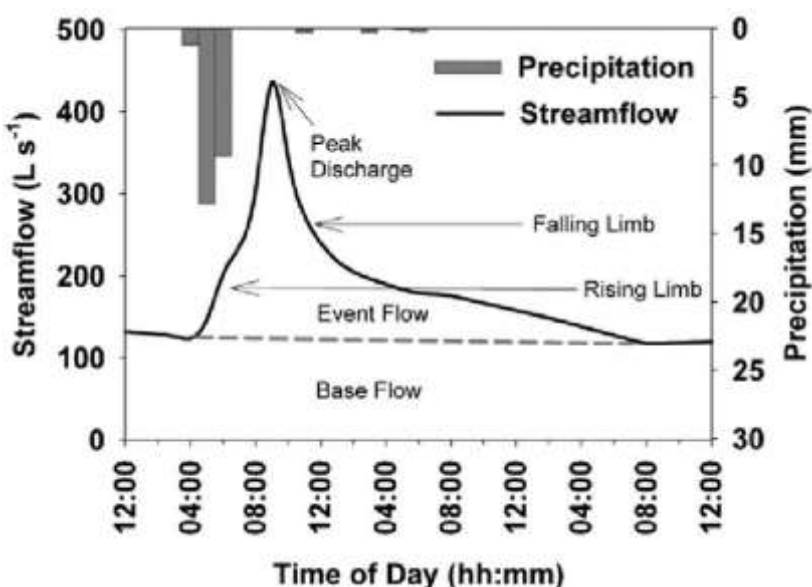


شکل ۱۵: مقادیر ϕ برای روش هیدروگراف واحد اسپي (Espey and Altman, 1978)

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{H}{0.8L} \\
 T_p &= \frac{3.1L^{0.23}\phi^{1.57}}{S^{0.25}I^{0.18}} \\
 Q_{up} &= \frac{31,620A^{0.96}}{T_p^{1.07}} \\
 T_B &= \frac{125,890A}{Q_{up}^{0.95}} \\
 W_{50} &= \frac{16,220A^{0.93}}{Q_{up}^{0.92}} \\
 W_{75} &= \frac{3,240A^{0.79}}{Q_{up}^{0.78}} \\
 t_A &= T_p - \frac{W_{50}}{3} \\
 t_B &= T_p - \frac{W_{75}}{3} \\
 t_E &= T_p + \frac{2W_{75}}{3} \\
 t_F &= T_p + \frac{2W_{50}}{3}
 \end{aligned}$$

پس از تعیین مقادیر معادلات اسپپی، ۷ نقطه به دست می آید که مختصات شکل ۱۴ و مختص حوضه مورد نظر است و می توان هیدروگراف واحد اسپپی ۱۰ دقیقه حوضه را محاسبه نمود. البته باید حاصل تقسیم حجم زیر این هیدروگراف بر مساحت زهکشی معادل یک واحد (در اینجا ۱ اینچ) باشد. اگر نبود باید با آزمون و خطا مقادیر، مقدار واحد را به دست آورد. سپس می توان بارش مازاد با پایه ۱۰ دقیقه بر حسب واحد مناسب با هیدروگراف واحد (در اینجا اینچ) را در عرض های هیدروگراف واحد ضرب تا هیدروگراف رواناب حوضه محاسبه شود.

اگر پایه زمانی مورد نظر بیشتر از ۱۰ دقیقه باشد، مثلاً "۲۰ دقیقه، باید یا روش را عوض کرد و یا دو هیدروگراف ۱۰ دقیقه واحد یا سیل را با یک شیف ۱۰ دقیقه بایکدیگر ترکیب (در حالت واحد باید سپس تقسیم بر ۲ کرد تا یک واحد ارتفاع رواناب حفظ شود) نمود. اگر پایه زمانی کمتر مورد نیاز باشد باید از روش هیدروگراف S آنها را باندازه مورد نظر شیف داده و سپس کم نمود. جزئیات روش ترکیب هیدروگراف ها در کتب هیدرولوژی عمومی موجود است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶: مثال از کاربرد هیدروگراف واحد در تبدیل بارش مازاد به رواناب متناظر [6]

روش معروف SCS, 1986 که به TR55 نیز معروف است بر اساس شماره منحنی (CN) و یکسری معادلات و جداول و نمودارها ابتدا مقدار تلفات را محاسبه و سپس این مقادیر تبدیل به مختصات هیدروگراف رواناب می شود. این روش ها تیپ رگبار را نیز برای هر منطقه قبول می کنند. به طور کلی استفاده از این روش ها نیز باید با احتیاط و واریسی همراه شوند (Daliri et al., 2011).

روش معروف منطقی ($Q=CIA$) که فقط دبی اوج را بر اساس شدت رگبار و مساحت زهکشی و بدون لحاظ تیپ رگبار و سایر موارد تعیین می کند و لذا تمام این اثرات را در یک ضریب C خلاصه کرده است تنها برای بررسی های اولیه قابل توصیه است. روش منطقی جنبشی نیز برای مناطق شهری بسیار کوچک شهری از مفاهیم زمان تمرکز جنبشی (بند زمان تمرکز) در حد پارکینگ به صورت مطالعات اولیه کاربرد دارد که جزئیات این روش ها در مرجع [6] در کنار روش های TR55، معادلات رگرسیون (USGS) و روش سانتاباربارای شهری (مدل SMADA) ارائه شده است. در این روش می توان از سایر روش ها بارش مازاد را حساب و وارد این مدل کرد. باید توجه کرد در روش سانتاباربارا همه مناطق نفوذ ناپذیر فرض شده که مستقیم به زهکش وصل می شوند. به طور کلی از نظر مولف، استفاده از تمام روش های تجربی و هیدرولیکی نیاز به بررسی و واسنجی با داده های منطقه معرف دارد و بدون کنترل قابل توصیه برای فازهای طراحی نیستند.

به عنوان مثال یکی از تجربه های مولف در محاسبه رواناب ورودی به شهر سنگان (استان خراسان رضوی)، با افزایش سطح، مقدار رواناب کم می شد و با کم شدن سطح دبی سیل زیاد می شد. این آنومالی در هیچ یک از روابط تجربی مانند رابطه منطقی یا روش SCS و شماره منحنی قابل برآورد نبود. تنها مدل های توزیعی که اثر غیر یکنواختی سطح حوضه را در کنار سایر پارامترهای تیپ رگبار و نفوذ درک می کردند قابل برآورد و تحلیل بود (دلیری ۱۳۹۱).

۲-۲-۳ محاسبه رواناب آلوده

مفاهیم

منبع آلودگی ها ممکن است به صورت های نقطه ای، خطی یا پهنه ای به عنوان منشأ آلودگی بدنه جریان های آبسطحی شهری، رودخانه های پذیرنده و آبهای زیرزمینی شهری باشد. در اینجا به روش

های مطالعه منابع پهنه ای آلودگی و صرفاً "رواناب شهری ناشی از آلودگی های سطح شهر روی رواناب شهری پرداخته شده است. البته نشت از پمپ بنزین ها و سایر سپتیک تانک ها یا ترک و شکستگی لوله های فاضلاب می تواند به دفعات باعث آلودگی سفره های زیرزمینی شهری شوند. که از دامنه بحث این کتاب خارج است و لذا برای مطالعه روش های مطالعه منابع خطی و نقطه ای به بدنه رودخانه و آبهای زیرزمینی به مرجع ۱ همین مولفین مراجعه شود.

روش های مطالعه آلاینده های سطحی رواناب شهری ممکن است مدل های تجربی، رگرسیون آماری، یا محاسبات عددی همراه نمونه برداری طبق ضوابط باشد. همچنین ممکن است با توجه به هدف و نیاز طراح، مطالعه برای یک رخد رگبار یا چندین رخداد رگبار (پیوسته در زمان) یا محاسبات برای کل یک دوره ماهانه و سالانه (گرده ای در زمان) صورت بگیرد.

به طور کلی بخشی از آلاینده های اصلی سطح شهری، بین دو رگبار و در دوره خشک روی سطح زمین و برگ و سایر اشیای غیر زنده تجمع می کند. برخی از آلاینده های شهری مانند بنزین، گازوئیل، نفت، روغن خودروها، ذرات و رسوبات لنت ترمز و انواع مصالح ساختمانی و مناطق در حال ساخت و ساز، مواد شیمیایی کود و فضای سبزه ها، آت و آشغال مردم مانند آدامس و ...، مدفوع حیوانات و برخی مواد دیگر که روی ذرات جامد می چسبند را شامل می شوند. بخشی یا تمام این آلاینده ها در هر رگبار شسته شده و وارد زهکش ها و سرانجام وارد بدنه آب پذیرنده که اغلب رودخانه ها هستند می گردند و لذا در کنار مدیریت منشاء آنها، نیاز به مدیریت کیفی (فصل ۴) این رواناب آلوده از اهمیت بالای زیست محیطی برخوردار است. در این خصوص ابتدا نیاز به مطالعه و محاسبه مقادیر و روند توزیع زمانی جهت روندیابی این آلاینده ها می باشد.

این آلودگی ها ممکن است به صورت ذرات جامد معلق یا به صورت محلول یا نامحلول در آب و یا چسبیده به ذرات جامد معلق حمل شوند و در جای دیگر طی فرایندهایی به مواد سمی تری نیز تبدیل شوند. مثلاً "رسوبات معلق باعث کاهش رسیدن نور در بدنه آب شده و لذا فرایندهای فتوسنتز آبریان و فون و فلور را دچار اختلال می کند. لذا نمونه گیری از رواناب شهری برای انواع آلاینده های محلول و ذرات جامد می تواند به عنوان شاخص مهمی در مطالعه رواناب آلوده در فاز اول باشد. همچنین مواد مغزی مانند فسفر و نیتروژن از مناطق فضای سبز و گیرو، می تواند باعث رشد جلبک در بدنه آب رودخانه پذیرنده شود. ازدیاد جلبک باعث اختلال در شرایط نرمال اکوسیستم و تجزیه

جلبک ها پس از مرگ، باعث کاهش اکسژن آب می گردد. کربن آلی که منشاء آنها از مواد باقی مانده گیاهی، لاشه برگ، و مدفوع حیوانات خانگی است با رواناب حمل شده و در اثر تجزیه در بدنه رودخانه باعث کاهش اکسیژن محلول (DO) می شوند. ترکیبات هیدروکربن (Hydrocarbons) با منشاء روغن موتور خودروها و نفت بوده که دارای ترکیبات سمی برای آبزیان هستند. فلزات ردیاب نیز مانند کادمیوم، مس، روی، سرب که منشاء مصالح ساختمانی از ساخت و ساز و یامصالح خود سیستم فاضلاب و لنت ترمز خودرو دارند مواد سمی برای محیط زیست محسوب می شوند. غلظت انواع حشره کش و آفت کش ها نیز اغلب در رواناب شهری و بدنه رودخانه های پذیرنده مقدار بیشتری از حد مجاز دارند.

در برخی از سیستم ها قدیمی دفع فاضلاب های شهری، سیستم های جمع کننده رواناب و فاضلاب ترکیبی ساخته شده اند. لذا منشاء آلاینده ها شامل فاضلاب شهری و صنعتی مضاف بر آلاینده های مذکور در رواناب شهری هستند. یک مورد دیگر از آلاینده های رواناب شهری مربوط شیرابه حوضچه جمع آوری باران (Catchbasin) (شکل ۲ بند ۱-۱) می باشد. این حوضچه ها در ورودی دهانه ریزش رواناب ساخته می شود تا آت و آشغال و ذرات ریز را در ابتدای سیستم به تله انداخته، تا در مسیر سیستم سیلاب رو یا فاضلاب رو ترکیبی، گرفتگی (Clog) ایجاد نکنند. البته این حوضچه ها نقش دیگری نیز دارند و آن جلوگیری از نفوذ بوی بد مواد جمع شده بارش های قبل بواسطه ایجاد یک مانداب می باشند. این مانداب بین رگبار ها به صورت سپتیک تانک در آمده و در بارش های بعدی مواد آلاینده را وارد سیستم جمع آوری می نمایند.

مدلسازی

مدلسازی بار آلودگی شهری ممکن است به صورت مجزا برای سطوح نفوذناپذیر و سطوح نفوذپذیر بالای یک گاتر یا دریچه باران ریز محاسبه شود. همچنین این محاسبات ممکن است به صورت ثابت در زمان (گرده ای در زمان) یعنی برای یک دوره ماه یا سال (کیلو گرم یا پوند بر سال یا ماه) اعمال شود و یا به صورت توزیعی یا پیوسته در زمان بر حسب میلی گرم بر لیتر برای طول یک خداد رگبار یا سری زمانی از رگبار ها محاسبه شود. به طور کلی برای مدلسازی در حالت پیوسته در زمان دو فاز وجود دارد. فاز تجمع آلاینده ها (Build-up) و فاز شسته شدن آلاینده ها (Wash-off). در این

خصوص اغلب از مدل های تجربی ساده، باتوجه به پیچیدگی موضوع استفاده می شود که می توانند مواد و ذرات جامد معلق را که شاخص کلیدی نیز هستند برآورد کنند.

سایر پارامترهای آلاینده‌گی نیز اغلب به عنوان نسبت ثابتی از آلاینده خاص (میلی گرم) به ذرات جامد معلق (گرم) برای هر کاربری خاص برآورد می شوند. ضریب این نسبت باید از مطالعات کاربری محلی برای هر نوع ماده محاسبه شود و ضمناً "فرض نسبت ثابت برای آلاینده های کلر و کل جامدات محلول (TDS) زمانیکه غلظت ها یک نسبت معکوسی با ذرات معلق دارند، صادق نیست (Roesner, 1982). برخی از این روش ها در مدل EPA-SWMM وارد شده اند.

۱) بار رواناب آلاینده ذرات جامد معلق از سطوح نفوذ ناپذیر (پیوسته در زمان) آلودگی های ذرات جامد بین هر بارش جمع می شوند. سرعت روند جمع شدن آنها در روزهای اول پس از بارش آخر زیاد بوده و بعد نرخ تجمع کم می شود. این رابطه تجمع اغلب نمایی است و پارامترهای واسنجی آن باید در هر منطقه حساب شود (Huber and Dickinson, 1988):

$$U_0 = K_3 (T_d)^{K_4}$$

$$P_0 = P_e + U_0 A_0$$

$$Av = a + br^c$$

$$P_2 = P_1 e^{-k \cdot \Delta t \cdot r_a}$$

$$c = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad W = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

U_0 وزن ذرات جامد جمع شده بر حسب پوند (lb) بر واحد مساحت قبل از یک باران، K_4 , K_3 ضرائب واسنجی و T_d فاصله زمانی از آخرین رگبار بر حسب روز. P_0 و P_e به ترتیب کل وزن مواد جامد قابل دسترس قبل از یک باران که می تواند شسته شود و وزن ذرات جامد باقی مانده روی سطح زمین بعد از آخرین باران.

Av فاکتور دسترسی. این فاکتور در مدل **EPA-SWMM** به عنوان فاکتور بهبود رابطه بین داده های مشاهده ای و نتایج مدل استفاده می شود. در روش های دستی ممکن است معادل ۱ لحاظ شود. مقدار این فاکتور به r مقدار رواناب بر حسب عمق بر واحد زمان (سطح زهکشی/دبی) مرتبط شده و ضرائب رابطه فاکتور دسترسی بهتر است در هر منطقه حساب شود.

Γ_a مقدار رواناب متوسط در فاصله زمانی Δt

k ضریب شستگی. این ضریب حدود ۴,۶ بر اینچ لحاظ می شود که با این ضریب حدود ۹۰ درصد کل ذرات جامد معلق طی ۱ ساعت با شدت رواناب ۰,۵ اینچ بر ساعت شسته می شود. ولی Sonne, 1980 ذکر کرد این ضریب بین ۰,۵۲ تا ۶,۶ اینچ می تواند بسته به قطر ذرات، شدت بارش و سطح حوضه قرار بگیرد.

P_1, P_2 به ترتیب وزن مواد جامد روی سطح در گام ۲ و ۱ زمان

W وزن آلودگی در واحد زمان

ΔV حجم رواناب بین فاصله زمانی

c غلظت آلاینده (وزن یا جرم بر واحد حجم)

مقدار کل بار ذرات جامد معلق در طول یک رگبار را می توان از جمع جزئی روابط بالا یا به صورت کلی از رابطه زیر نیز محاسبه کرد:

$$\Delta P_T = P_0(1 - e^{-kR})$$

R عمق کل رواناب (جمع کل رواناب تقسیم بر سطح).

روابط در سیستم ابعادی همگن بوده و لذا می توان با رعایت ابعادی واحد **SI** یا **U.S** انتخاب نمود. مثال جدول ۷: یک قسمت از حوضه شهری نفوذ ناپذیر با مساحت ۵۰ ایکر، قبل از رخداد رگبار، دارای ۴۷۰۰ پوند ذرات جامد تجمع شده است. هیدروگراف رواناب رگبار برای این سطح در مدل **SMSDS** یا **HEC-HMS** یا از روش های مذکور در جدول زیر حساب شده است. گام های زمانی ۱۲ دقیقه گرفته شده و k برابر ۴,۶ اینچ لحاظ شده است. غلظت آلودگی و مقدار بار آلودگی

در این رگبار را به صورت هیدروگراف آلودگی (پولوتوگراف) ترسیم و مقدار کل بار آلودگی را نیز به صورت دستی با معادلت بالا و در مدل **EPA-SWMM** محاسبه کنید.

جدول ۷، نتایج محاسبات رواناب آلوده روی سطح نفوذ ناپذیر شهری - غلظت و بار معلق جامد [6]*

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
t_1 (hr)	t_2 (hr)	Q_1 (cfs)	r_1 (in./hr)	r_a (in./hr)	ΔV (ft ³)	P_1 (lb)	P_2 (lb)	ΔP (lb)	c (lb/ft ³)	c (mg/L)	W (lb/hr)
0	0.2	0	0.000	0.010	360	4700	4657	43	0.119	1899	213
0.2	0.4	1.0	0.020	0.038	1368	4657	4499	159	0.116	1858	794
0.4	0.6	2.8	0.056	0.075	2736	4499	4197	301	0.110	1765	1507
0.6	0.8	4.8	0.095	0.124	4500	4197	3745	452	0.101	1610	2262
0.8	1.0	7.7	0.153	0.177	6408	3745	3183	561	0.088	1403	2807
1.0	1.2	10.1	0.200	0.218	7920	3183	2604	579	0.073	1171	2895
1.2	1.4	11.9	0.236	0.234	8496	2604	2100	505	0.059	951	2523
1.4	1.6	11.7	0.232	0.223	8100	2100	1710	390	0.048	771	1949
1.6	1.8	10.8	0.214	0.196	7128	1710	1428	283	0.040	635	1413
1.8	2.0	9.0	0.179	0.165	5976	1428	1227	201	0.034	538	1003
2.0	2.2	7.6	0.151	0.137	4968	1227	1082	145	0.029	468	726
2.2	2.4	6.2	0.123	0.115	4176	1082	973	109	0.026	417	543
2.4	2.6	5.4	0.107	0.100	3636	973	887	86	0.024	377	428
2.6	2.8	4.7	0.093	0.084	3060	887	821	66	0.022	346	330

OSMAN AKAN*

۲) بار رواناب آلاینده ذرات جامد معلق از سطوح نفوذ پذیر (پیوسته در زمان)

در این خصوص در حوضه های شهری تحقیقات کمی انجام شده و عمده روابط تعمیم داده شده به حوضه های شهری از معادلات برآورد رسوب و فرسایش آبخیزداری بوده است. این روش ها نیز اغلب به صورت سالانه برآورد می کنند و لذا برای تبدیل معادلات به صورت توزیعی در زمان، تقریب زیادی دارند. با این وجود می توان به کمک واسنجی (دلیری رسوب سد شیرین دره، ۱۳۸۶) معادلات فرسایش رسوب که در اینجا ذکر می شود را در حوضه های شهری استفاده کرد.

روش USLE (Wischeimer and Smith,1985)

روش معادله تلفات جهانی خاک مشابه روشی است که در مدل EPA-SWMM نیز استفاده شده است. این روش از نظر ابعادی همگن نیست. برای هر فاصله زمان Δt معادله تلفات خاک برای محاسبه وزن جامدات رواناب در طول فاصله زمانی Δt بر حسب پوند به شکل زیر نوشته می شود:

$$\Delta P = 2000 A_p (R K L_s C P_F)$$

سطح نفوذ پذیر بر حسب ایگر، A_p ، و فاکتور بارش، R ضریب فرسایش پذیری خاک (tons/acre)، L_s نسبت گرادیان طول-شیب، C فاکتور مدیریت کاشت، P_F فاکتور عملیات کنترل فرسایش.

فاکتور بارش از معادله $R = E_{i30}$ و معادله زیر حساب می شود:

$$E = [9.16 + 3.31 (\text{Log } i)] i \Delta t$$

i شدت رگبار (اینچ بر ساعت) در طول فاصله زمانی جزئی (ساعت)، i_{30} متوسط حداکثر شدت رگبار ۳۰ دقیقه ای بر حسب اینچ بر ساعت رگبار مورد نظر.

ضریب فرسایش پذیری خاک به عواملی چون توزیع قطر ذرات خاک، بافت، نفوذپذیری، و محتوی مواد آلی خاک بستگی دارد و می توان از جدول ۸ برآورد کرد.

مقدار L_s :

$$L_s = L^{0.5} (0.0076 + 0.53 S + 0.76 S^2)$$

L طول جریان روزمینی بر حسب فوت از نقطه آغاز جریان روزمینی تا نقطه ورود رواناب به یک کانال مشخص مانند گاتر یا درون ریز و S شیب متوسط سطح روی طول رواناب (ft/ft).

جدول ۸: فاکتور فرسایش پذیری خاک (K) بر حسب تن بر ایگر (Schwab et al.1981)

Textural class	Organic matter content (%)		
	0.5%	2.0%	4.0%
Fine sand	0.16	0.14	0.10
Very fine sand	0.42	0.36	0.28
Loamy sand	0.12	0.10	0.08
Loamy very fine sand	0.44	0.38	0.30
Sandy loam	0.27	0.24	0.19
Very fine sandy loam	0.47	0.41	0.33
Silt loam	0.48	0.42	0.33
Clay loam	0.28	0.25	0.21
Silty clay loam	0.37	0.32	0.26
Silty clay	0.25	0.23	0.19

Source: Schwab et al. (1981).

فاکتور مدیریت کاشت بر اساس نظر و شمایلر و اسمیت (۱۹۷۸):

خاک لخت: ۱

مناطق با پوشش بیش از ۹۵ درصد گیاهان شبیه علف و گرس: ۰,۰۰۳

جنگل تخریب نشده با تاج پوشش ۱۰۰ درصد ضریب ۰,۰۰۰۱ و با تاج پوشش ۲۰ درصد ۰,۰۰۹

فاکتور عملیات کنترل فرسایش بیشتر در مناطق کوهستانی معنی دارد و شامل ایجاد بانکت؛ تراس، پیتینگ، چکدم، انواع سازه های گابیونی برای حفاظت خاک و آبخیزداری یا حفاظت اراضی کشاورزی و ... است که در حوضه های شهری وجود ندارد. لذا این ضریب واحد لحاظ می شود.

از روابط بالا می توان برای توسعه پولوتوگراف رسبودهی معلق استفاده کرد و می توان مقدار کل بار را از جمع بار جزئی محاسبه نمود. همچنین می توان مقدار کل آلودگی یا بار رسوب یک رگبار را از رابطه USLE با قراردادن مقدار فاکتور بارش از جدول ۹ نیز محاسبه نمود:

جدول ۹: فاکتور بارش برای یک رگبار ساده با دوره بازگشت ها در شهرهای مختلف (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸)

Location	Return period (years)				
	1	2	5	10	20
Birmingham, Alabama	97	122	151	172	194
Little Rock, Arkansas	41	69	115	158	211
San Luis Obispo, California	11	15	22	28	34
Springfield, Colorado	31	51	84	112	152
Hartford, Connecticut	23	33	50	64	79
Washington, D.C.	39	57	86	108	136
Miami, Florida	93	134	200	253	308
Atlanta, Georgia	49	67	92	112	134
Chicago, Illinois	33	49	77	101	129
Indianapolis, Indiana	29	41	60	75	90
Charles City, Iowa	33	47	68	85	103
Great Falls, Montana	4	8	14	20	26
Lincoln, Nebraska	36	51	74	92	112
Concord, New Hampshire	18	27	45	62	79
Atlantic City, New Jersey	39	55	77	97	117
Albuquerque, New Mexico	4	6	11	15	21
Buffalo, New York	15	23	36	49	61
Raleigh, North Carolina	53	77	110	137	168
Fargo, North Dakota	20	31	54	77	103
Cincinnati, Ohio	27	36	48	59	69
Burlington, Vermont	15	22	35	47	58
Richmond, Virginia	46	63	86	102	125
Spokane, Washington	3	4	7	8	11
Huntington, West Virginia	18	29	49	69	89
Madison, Wisconsin	29	42	61	77	95
Cheyenne, Wyoming	9	14	21	27	34

مثال جدول ۱۰: یک محوطه پارک با مساحت ۳ ایکر در منطقه شهری، با پوشش چمن پوشیده شده است. بافت خاک لومی - شنی با ۰٫۵ درصد مواد آلی. طول جریان ۴۰۰ فوت و شیب جهت جریان ۰٫۰۱ فوت بر فوت می باشد. مقدار مواد جامد معلق (توزیع زمانی بار و توزیع غلظت) را از این پارک با بارش ۳ ساعته و توزیع شدتی که در جدول ۱۰ ارائه شده است محاسبه کنید.

جدول ۱۰: نتایج محاسبات رواناب آلوده روی سطح نفوذ پذیر شهری - غلظت و بار معلق جامد [6]

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Time (hr)	i (in./hr)	E	R	K	C	L_S	P_F	A_p (acres)	ΔP (lb)	W (lb/hr)
0.0-0.5	0.30	1.114	1.448	0.27	0.003	0.163	1.0	3.0	1.15	2.30
0.5-1.0	0.50	2.041	2.653	0.27	0.003	0.163	1.0	3.0	2.10	4.20
1.0-1.5	1.30	6.199	8.059	0.27	0.003	0.163	1.0	3.0	6.38	12.76
1.5-2.0	0.40	1.569	2.040	0.27	0.003	0.163	1.0	3.0	1.62	3.24
2.0-2.5	0.30	1.114	1.448	0.27	0.003	0.163	1.0	3.0	1.15	2.30
2.5-3.0	0.20	0.685	0.891	0.27	0.003	0.163	1.0	3.0	0.71	1.42

۳) بار رواناب آلاینده ذرات جامد معلق سالانه (گرده ای در زمان)

روش های پیوسته در زمان برای مطالعات دقیق تر و طراحی نیاز است. روش های گرده ای در زمان برای مطالعات اولیه و برنامه ریزی های کلان مناسب هستند. اگرچه کنترل های میدانی در اینجا نیز ضروری است. ای روش ها مقدار بار آلودگی را برای یک دوره یکساله مشخص می کنند. سه روش اصلی که بیشتر معروف است شامل روش EPA (۱۹۷۷) برای مناطق با سیستم مجزا و ترکیبی فاضلاب رو، روش رگرسیونی USGS (۱۹۹۰)، و روش تجربی واشینگتن (۱۹۸۷) وجود دارد.

روش EPA MODEL برای برآورد بار آلودگی سالانه از رواناب شهری:

این روش توسط Heaney, 1977 بر اساس یکسری روابط برای سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) توسعه داده شد.

حالت بدون زهکش یا زهکش سیلاب رو مجزا:

$$M_s = \alpha P f s$$

حالت سیستم ترکیبی جمع آوری سیلاب رو و فاضلاب رو:

$$M_c = \beta P f s$$

M بار آلودگی سالانه از رواناب شهری بر حسب پوند از هر ایگر سطح زمین
 آلفا و بتا به ترتیب فاکتور بار آلودگی برای سیستم مجزا و ترکیبی از جداول ۱۱ و ۱۲
 P بارش سالانه اینچ بر سال

f تابع تراکم جمعیت و s فاکتور جارو و نظافت سطح شهر
 مقدار f برای مناطق مسکونی: (D تراکم جمعیت شخص بر ایگر)

$$f = 0.142 + 0.218 D^{0.54}$$

مقدار f برای مناطق تجاری و صنعتی برابر واحد و برای دیگر مناطق مانند مدرسه، پارک ها و آرامستان
 ها ۰,۱۴۲ می باشد.

فاکتور جارو s به فواصل دوره نظافت (N_s) بر حسب روز بستگی دارد. اگر مقدار فواصل نظافت بیش
 از ۲۰ روز باشد، فاکتور s برابر واحد و اگر فواصل نظافت کمتر از ۲۰ روز باشد مقدار s از رابطه زیر
 محاسبه می شود:

$$s = N_s / 20$$

از این روابط بار آلودگی ها (SS جامدات معلق، VS جامدات فرار و بخارشدنی، PO_4 فسفات و
 N نیتروژن) به صورت مجزا و سالانه حساب می شود. برای محاسبه غلظت در یکسال باید مقدار
 حجم رواناب مازاد سالانه را از یک روش مناسب یا روش های موجود در کتب هیدرولوژی عمومی
 یا روش تقریبی زیر برآورد نمود. یک روش ساده برای بررسی های اولیه جهت محاسبه رواناب سالانه
 توسط Heaney, 1977 پیشنهاد شده است:

$$R = \left[0.15 + 0.75 \left(\frac{I}{100} \right) \right] P - 5.234 d^{0.5957}$$

R = annual runoff in inches per year,

I = imperviousness in percent,

P = annual precipitation in inches per year, and

d = depression storage in inches.

$$d = 0.25 - 0.1875 \left(\frac{I}{100} \right)$$

جدول ۱۱: فاکتور بارگیری α برای منطقه شهری با سیستم مجزای سیلاب رو

Land use	BOD ₅	SS	VS	PO ₄	N
Residential	0.799	16.3	9.4	0.0336	0.131
Commercial	3.200	22.2	14.0	0.0757	0.296
Industrial	1.210	29.1	14.3	0.0705	0.277
Other	0.113	2.7	2.6	0.0099	0.060

Source: After Heaney et al. (1977).

جدول ۱۲: فاکتور بارگیری β برای منطقه شهری با سیستم ترکیبی

Land use	BOD ₅	SS	VS	PO ₄	N
Residential	3.290	67.2	38.9	0.1390	0.540
Commercial	13.200	91.8	57.9	0.3120	1.220
Industrial	5.000	120.0	59.2	0.2910	1.140
Other	0.467	11.1	10.8	0.0411	0.250

Source: After Heaney et al. (1977).

در مطالعات علاج بخشی آب شرب سد ایلام، تیر ماه سال ۸۷ پس از یک سیل آلوده در سراب مخزن سد، مشکل بو در آب شرب شهر پیش آمد. محاسبات سیلاب بر اساس پهنه رگبار و مدل های آلودگی مشابه روش های مذکور انجام شد تا علت مشکل سیستم مشخص شود (دلیری، ۱۳۸۷)

مثال جدول ۱۳: در یک منطقه شهری با مساحت ۶۵ ایکر تجاری، و سیستم های مجزای دفع فاضلاب و سیلاب رو، به دنبال بار متوسط سالانه و غلظت سالانه آلاینده های VS, SS, BOD5 و PO4 و N هستیم. حدود ۳۹ ایکر سطح نفوذ ناپذیر است. خیابان ها ماهی یکبار جاروب می شود. بارش سالانه ۳۶ اینچ می باشد.

جدول ۱۳: نتایج محاسبات بار سالانه محوطه شهری با روش EPA (6)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Pollutant	α	M_s (lb/acre/year)	Total loading (lb/year)	c (lb/ft ³)	c (mg/L)
BOD ₅	3.2	115.2	7,488	1.59×10^{-3}	25.4
SS	22.2	799.2	51,948	1.10×10^{-2}	176.4
VS	14.0	504.0	32,760	6.94×10^{-3}	111.2
PO ₄	0.0757	2.7	176	3.72×10^{-5}	0.6
N	0.296	10.7	696	1.47×10^{-4}	2.4

۲-۳ روندیابی

پس از برآورد رواناب در نقاط مورد نظر، ممکن است نیاز باشد هیدروگراف طرح به تقاطع مختلف حوضه منتقل شود. این هیدروگراف بسته به اینکه در چه نوع مسیر هیدرولیکی طی یا تخلیه شود، بر اساس قوانین هیدرولیکی حاکم بر آن سیستم می بایست روندیابی گردد. به طور کلی جریان متمرکز کانالی و جریان روزمینی هر دو با فشار سطح آزاد اتمسفر، عمده ترین نوع جریان در رواناب شهری می باشند. اگرچه جریان های تحت فشار نیز در این سیستم ممکن است وجود داشته باشد و یا ایجاد شود که می بایست بر اساس قوانین هیدرولیک تحت فشار وارد محاسبات شود.

بارش مازاد در حوضه های شهری به طور معمول با جریان ورقه ای کم عمق روی پشت بام ها و پیاده رو، پارکینگ و سنگفرش خیابان ها (نفوذ ناپذیر) و روی مناطق چمنی، فضای سبز و جاده خاکی (نفوذ پذیر) آغاز می شود. این نوع جریان یک نوع خاص از جریان کانال های روباز با عمق کم به نام جریان روزمینی محسوب می شود.

جریان روزمینی باتوجه به شبکه موجود شهری ممکن است خود را از ناودان ساختمان ها یا از روی پیاده رو و زهکش خیابان ها یا دریچه های کنار خیابان (Gutter) به نهر کوچک و سپس جمع کننده های بزرگ تر زیر زمین شامل سیلاب رو ها به صورت جریان کانالی ادامه مسیر داده و در انتهای حوضه توسط کانال های زهکشی بزرگتر که اغلب روی زمین هستند به خارج شهر منتقل و به بدنه آبی رودخانه های منطقه یا در شهرهای مدرن برای بهره برداری وارد سیستم های مدیریتی یا تصفیه آب شوند. در انتهای مسیر ممکن است جریان نزدیک به پر شود و حتی این شرایط اگر تحت فشار شود ممکن است باعث گرفتگی هیدرولیکی و دلیل برخی از آبگرفتگی ها شهری در هنگام بارش مضاف بر ریختن آت و آشغال توسط مردم (اهمیت فرهنگ سازی) گردد. نیروی محرکه در سیلاب رو ها نیروی ثقل است بر خلاف فاضلاب رو ها که ممکن است در مناطقی از نیروی تلمبه خانه ها نیز بهره گرفت. اصول مفاهیم هیدرولیک کانال های روباز و تا حدی لوله های تحت فشار، توسط همین مولفین در مرجع ۱ ارائه شده و باتوجه به پیش نیاز این کتاب برای خواننده شامل اصول هیدرولوژی عمومی و هیدرولیک عمومی، در اینجا مسائل تئوری هیدرولیک تا حد نیاز ارائه شده است.

۲-۳-۱ روندیابی کانالی و جریان روزمینی

۱) جریان روزمینی (محاسبه عمق و دبی و سرعت)

جریان روزمینی می تواند بر اساس قوانین هیدرولیک کانال روبار توصیف شود. ولی باید حالت جریان (State) مشخص شود. اساس این جریان، خطی (لامینار) است. زیرا عمق جریان کم است و لذا باعث می شود عدد رینولدز (نسبت سرعت سطح مقطع در شعاع هیدرولیک (VR_h) به لزجت جنبشی یا سینماتیک آب (ν)) زیر ۵۰۰ باشد. ولی در عمل در رواناب شهری به دلیل ضربات بارش، چاله های ریز روی سطح، آت و آشغال، یا پوشش چمنی سطوح فضای سبز نفوذ پذیر، این جریان از نوع آشفته می شود (Akan, 1993).

جریان روزمینی اساساً "جریان غیر یکنواخت تدریجی غیر دائم است و لذا معادلات سنت و نانت برای حل مسائل این نوع جریان استفاده می شود:

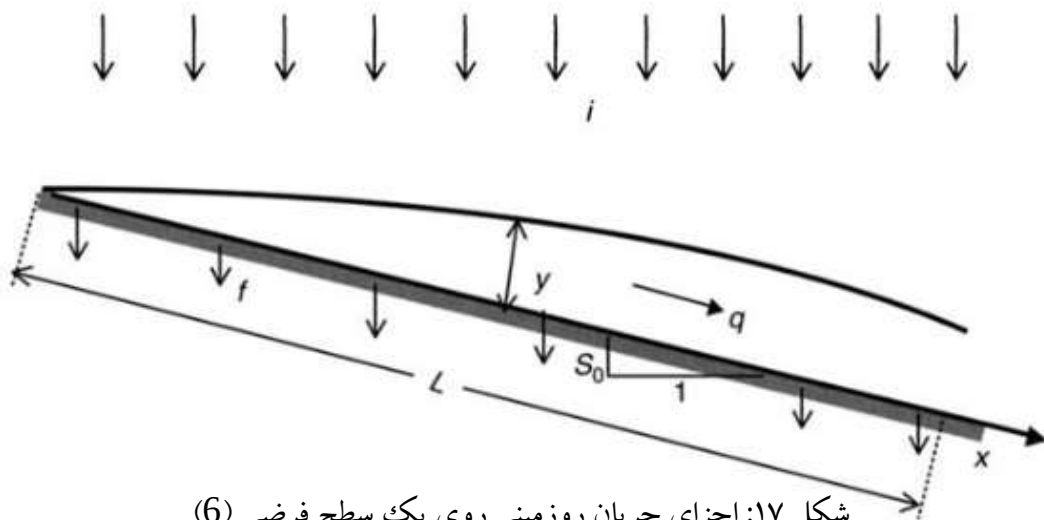
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_{LAT}$$

پیوستگی:

مومنوم:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f)$$

حل تحلیلی معادلات بالا امکان پذیر نبوده و لذا باید با روش های عددی پیچیده حل شوند (۱). با این وجود می توان معادلات بالا را با حفظ دقت مناسب تا حدی برای جریان روزمینی عمده مطالعات رواناب شهری با روش تقریب مدل موج جنبشی (Kinematic - Wave Model) که توسط (Eagleson, 1970 و Henderson, 1966) تشریح شده و یا با تحلیل و روش های (Akan, 1993) به شکل زیر محاسبه نمود. اساساً همانطور که از شکل ۱۷ نیز مشخص است جریان روزمینی را می توان روی یک کانال مستطیلی پهن با دبی واحد عرض نوار سطح روی طول x فرض کرد.



شکل ۱۷: اجزای جریان روزمینی روی یک سطح فرضی (6)

در این جا شعاع هیدرولیکی و عمق هیدرولیکی معادل عمق جریان (y) و عرض سطح آب (T) با پهنای سطح جریان روزمینی (W) برابر است. لذا برای سادگی می توان دبی بر واحد عرض

($q=Q/W$) لحاظ کرد. بر اساس شکل معادله پیوستگی سنت و نانت می توان برای این نوار صفحه ای یکنواخت، معادلات سنت و نانت را برای جریان روزمینی به شکل موج جنبشی زیر نوشت:

$$(A) \quad \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = i - f$$

i مقدار بارش و f مقدار تلفات بارش می باشد.

بر اساس معادله مومتم سنت و نانت، و ساده سازی این معادله با حذف ترم های سمت چپ، مشخص مس شود شیب کف S_0 و شیب اصطکاک (شیب خط انرژی) (S_f) برابر است. لذا می شود برای یک جریان واحد عرض، برای حالت لامینار از معادله دارسی ویسباخ و برای حالت آشفته از معادله مانینگ به شکل زیر معادله موج جنبشی را نوشت:

$$(B) \quad q = \alpha y^m$$

مقدار ضرایب این رابطه به معادلات مقاومت جریان بستگی دارد. در اینجا برای شرایط جریان آشفته مقدار $m = 5/3$ و مقدار آلفا از رابطه زیر بدست می آید:

$$\alpha = \left(\frac{k}{n}\right) S_0^{1/2}$$

مقدار n زبری مانینگ جریان کانالی از جدول ۳ و زبری موثر مانینگ جریان روزمینی از جداول ۲.

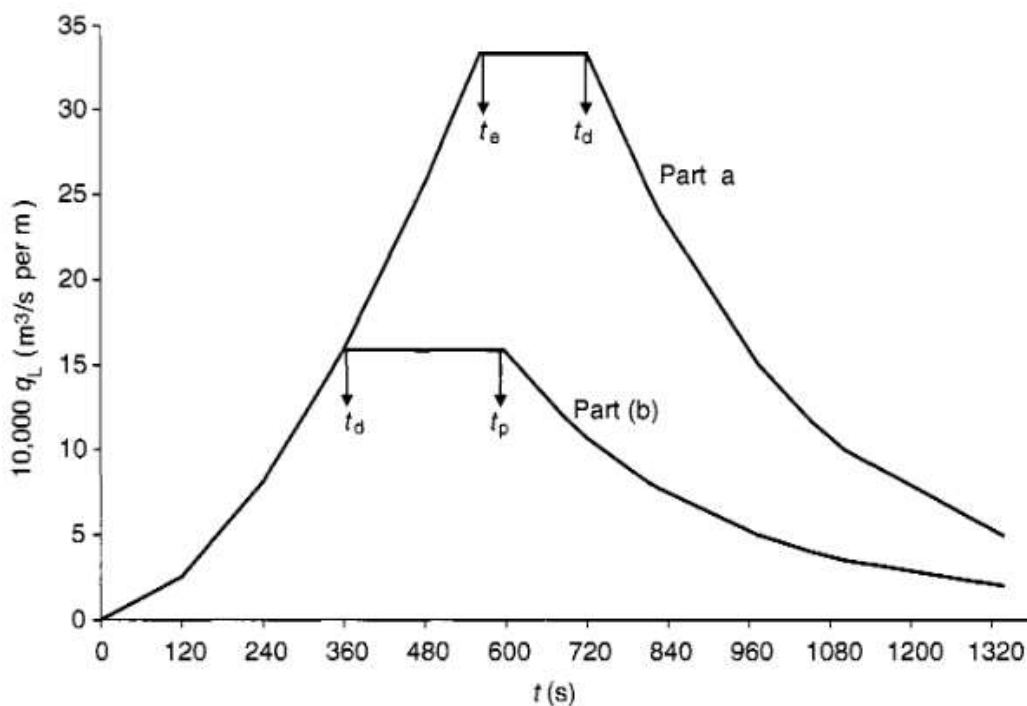
روندیابی جریان روزمینی روی سطوح نفوذ ناپذیر

برای یک سطح مشابه شکل ۱۷ و بارش ثابت معادل i_0 می توان معادلات A و B را به صورت همزمان و تحلیلی حل نمود. در این حالت ترم راست معادله A با مقدار بارش مازاد i_0 برابر است. شرط مرزی برای حل این روابط و شکل ۱۷ با $x=0$ در سراب جریان مقدار عمق $y=0$ و شرایط اولیه نیز مقدار عمق در هر زمان $t=0$ مقدار عمق $y=0$ می باشد. این روش توسط Eagleson, 1970 بر پایه روش خطوط مشخصه تشریح شده است (در مرجع ۱ این مولفین تشریح شده است).

یک روش ساده دیگر در اینجا این است که شرایط اولیه در زمان بارش مازاد، روی صفحه فرضی بالا خشک باشد و لذا در زمان $t=0$ جریان آغاز شود. چند حالت برای این فرض داریم. ابتدا بر اساس

رابطه زیر زمان تعادل (t_e) حساب شود. سپس بر اساس اینکه تداوم بارش مازاد (t_d) برابر، بیشتر یا کمتر از این زمان تعادل باشد، با توجه به معادله مربوطه، مقدار دبی بر واحد عرض و زمان برای شاخه صعودی یا نزولی شکل ۱۸ مشخص شود (در شکل a مقدار بارش مازاد برابر یا مساوی از زمان تعادل است و در شکل b کمتر از زمان تعادل است). همانطور که در بند زمان تمرکز نیز ذکر شد در زمان تعادل (t_e) دبی در انتهای صفحه به تعادل می رسد و این زمان در مواردی با زمان تمرکز برابر است.

$$t_e = \frac{L^{1/m}}{(\alpha i_0^{m-1})^{1/m}}$$



شکل ۱۸: نتایج محاسبات جدول ۱۴: هیدروگراف مدل موج جنبشی جریان روزمینی [6]

در خصوص مشخه های زمانی حوضه بحث مبسوطی در مرجع ۱ همین مولفین شده است.

اگر $t_e \leq t_d$ (شکل ۱۸، a). برای محاسبه شاخه صعودی دوره $(t \leq t_e)$:

$$(A1) \quad q_L = \alpha (i_0 t)^m$$

برای $(t_e < t < t_d)$:

$$q_L = i_0 L$$

مقدار رواناب در شاخه شروع به افت می کند وقتی بارش متوقف شود در $t = t_d$ و برای زمان های $t > t_d$:

$$(A2) \quad t = t_d + \frac{\frac{L}{\alpha y_L^{m-1}} - (y_L/i_0)}{m}$$

$$(A3) \quad y_L = \left(\frac{q_L}{\alpha}\right)^{1/m}$$

y_L عمق جریان در پایاب صفحه.

اگر $t_e > t_d$ (شکل ۱۸، b) باران قبل از اینکه به زمان تعادل برسد، متوقف می شود. برای محاسبه شاخه صعودی می توان از همان معادله A1 برای دوره $0 < t < t_d$ استفاده کرد. شاخه هیدروگراف افقی برای شرایط $t_d < t < t_p$ با یک دبی واحد عرض که ثابت باقی می ماند معادل:

$$q_L = \alpha (i_0 t_d)^m$$

در جاییکه زمان t_p :

$$t_p = t_d - \left(\frac{t_d}{m}\right) + \frac{L}{m\alpha(i_0 t_d)^{m-1}}$$

وقتی زمان از $t_p > t$ باشد، مقدار جریان کاهش پیدا می کند و از معادلات A2 و A3 برای محاسبه مشخصات شاخه نزولی هیدروگراف رواناب استفاده می شود. در اینجا قسمت صاف یا افقی هیدروگراف معرف شرایط تعادل نیست اگرچه جریان در پایاب صفحه مقدار ثابت دارد ولی عمق و دبی در بالای صفحه در حال کاهش است. این پدیده توسط روش خطوط مشخصه بهتر تفسیر می شود (۱). با این وجود مشخص است که با قطع شدن بارش مقدار جریان در پایاب صفحه تا زمانی که شرایط زمانی $t_p > t$ برقرار نشود کم نمی شود.

معادلات موج جنبشی B A از نظر ابعادی همگن هستند یعنی با تمام سیستم ها سازگار هستند با این وجود به دلیل ترکیب این معادلات با معادله تلفات مانینگ در شرایط آشفته، باعث می شود که به دو سیستم SI و U.S محدود شویم مگر اینکه ضرایب واحد k اصلاح شود.

اگر از ضریب $k = 1.49 ft^3 / S$ ، واحد دبی واحد بر عرض $cf s / ft$ ، واحد شدت i معادل ft / s ، L و y بر حسب فوت.

اگر از ضریب $k = 1.0 m^3 / S$ ، باشد ثانیه و متر به ترتیب برای زمان و طول جایگزین می شوند.

واحد دبی واحد بر عرض m^3 / s ، واحد شدت i معادل m / s ، L و y بر حسب متر.

مثال جدول ۱۴.

طول یک پارکینگ (L) ۶۰ متر با شیب کف $S_0 = 0.01$ است. سطح پارکینگ از رس لخت با ضریب مانینگ از جدول ۲ $n = 0.02$ تشکیل شده است. یک رگبار بارش مازاد ثابت معادل $i_0 = 20 mm/hr$ تولید می کند. هیدروگراف رواناب را در انتهای پارکینگ برای شرایط زیر محاسبه کنید. (شرط a) $t_d = 12 min$ و (شرط b) $t_d = 6 min$.

جدول ۱۴: نتایج محاسبات مثال مدل موج جنبشی جریان روزمینی (شکل ۱۸) [6]

(a)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Rising limb		Falling limb		
t (s)	q_L ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	q_L ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	y_L (10^{-3} m)	t (s)
0	0.00	33.33	3.12	720
120	2.54	24.00	2.56	828
240	8.08	15.00	1.93	975
360	15.87	10.00	1.52	1102
480	25.64	5.00	1.00	1332
562	33.33			

(b)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Rising limb		Falling limb		
t (s)	q_L ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	q_L ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	y_L (10^{-3} m)	t (s)
0	0.00	15.87	2.00	598
120	2.54	12.00	1.69	685
240	8.08	8.00	1.33	813
360	15.87	4.00	0.87	1053
		2.00	0.58	1336

روندیابی جریان روزمینی روی سطوح نفوذ پذیر

روش تحلیلی حل معادلات جنبشی که در مثال بالا ارائه شد برای این قسمت نیز با فرض ثابت بودن شدت بارش مازاد قابل استفاده است. اما در شرایط واقعی شدت رگبار همیشه متغیر است و لذا چاره ای جز استفاده از روش های حل عددی نیست. در اینجا باید معادلات موج جنبشی با معادلات نفوذ گرین و آمپت به طور همزمان حل شوند. مثال های حل تحلیلی و عددی از جریان روزمینی به تفصیل در مرجع ۱ همین مولین ارائه شده است.

۲) جریان کانالی

روندیابی سیل در مناطق شهری شامل عبور آب از گاترها، زهکش کنار خیابان و سیلاب روها می شود. این جریان ها از نوع متغیر تدریجی / سریع و غیردائم هستند. لذا معادلات سنت ونانت به صورت دینامیکی مناسب حل این نوع روندیابی شهری هستند. در این حالات استفاده از مدل های مناسب جهت حل معادلات مشتقات جزئی ناگزیر می باشد. با این وجود شکل ساده شده معادلات سنت ونانت به صورت هیدرولیکی برای حل این مسائل و فازهای اولیه مطالعات وجود دارد. همچنین روش های هیدرولوژیکی که اثر معادلات مومنتوم را به صورت روابط و نمودار و ضرائب لحاظ کنند به صورت گرده ای وجود دارند. البته اشکال روش های هیدرولوژیکی این است که اثر برگشت آب را نمی توانند در دهانه ورود کالورت یا پل ها محاسبه کنند. روش های ساده ای چون ماسکینگام کانج با لحاظ جریان جانبی یک نمونه از این روش های ساده است. این روش ها در مدل های چون مدل HEC-HMS و یا MIKE وجود دارد. همچنین مدل HEC-RAS برای مدل کردن پروفیل سطح آب کانال ها مناسب است. باتوجه به اینکه در مرجع ۱ همین مولفین کلیه روش های گرده ای و توزیعی (هیدرولیکی) و دینامیکی روندیابی رودخانه و کانال ها تشریح شده است خواننده می تواند برای اطلاعات بیشتر به این منبع مراجعه نماید.

۲-۳-۲ روندیابی رواناب آلوده

ابتدا باید نوع آلاینده یا آلاینده ها از نظر مانا بودن یا غیر مانا بودن مشخص شود. مثلاً "اگر نوع آلودگی مورد نظر نسبت به زمان در محیط واکنش می دهد (غیرمانا) نوع واکنش و معادله آن باید مشخص شود تا بتوان تغییرات را نسبت به زمان و مکان روندیابی کرد. روش محاسبه این موارد مانا و به ویژه غیرمانا به صورت روابط ساده که ضرائب آن در آزمایشگاه با نمونه گیری میدانی یا از جداول مشخص می شود تا روش های حل عددی در مدل هایی هیدرودینامیک چون CE-QUAL-W2 وجود دارد.

اگر شاخص آلاینده مانا باشد می توان به کمک روش های ساده هیدرولوژیکی مانند روش روندیابی ماسکینگام مشخصات هیدروگراف غلظت آلاینده (Pollutograph) و باروگراف آلاینده (Loadograph) را محاسبه نمود.

اگر W بار آلاینده نسبت به زمان باشد، و Q دبی جریان با واحد حجم بر زمان باشد، غلظت آلاینده بر حسب وزن در حجم با واحدهای سازگار از رابطه زیر به دست می آید:

$$c = \frac{W}{Q}$$

با فرض مانا بودن آلاینده در اینجا می توان مدل انتقال W را از روی معادله روندیابی پیوستگی ماسکینگام محاسبه کرد:

مدل روندیابی جریان ماسکینگام:

$$Q_{D2} = C_0 Q_{U2} + C_1 Q_{U1} + C_2 Q_{D1}$$

رونیابی بار:

$$W_{D2} = C_0 W_{U2} + C_1 W_{U1} + C_2 W_{D1}$$

در روابط بالا اندیس ۱ و ۲ معرف ابتدا و انتهای گام زمانی ($\Delta t = t_2 - t_1$) و D و U به ترتیب پایین دست و بالادست بازه را مشخص می کنند.

جهت محاسبه و روندیابی هیدروگراف غلظت در نقطه ای مورد نظر، اول باید هدرگراف جران (Q) را روندیابی نمود سپس آن را به هیدروگراف غلظت آلاینده مشروط به مانا بود تبدیل نمود. همچنین این روش تقریبی بوده و تاخیر هیدروگراف های آلاینده غیر محلول با جریان لحاظ نشده است.

مثال جدول ۱۵: عرض های هیدروگراف دبی و پولوتوگراف در بالادست یک کانال در ستون های ۲ و ۳ جدول ۱۵ ارائه شده است. شرایط اولیه نیز در زمان $t=0$ انتهای بازه کانال به شرح زیر است:

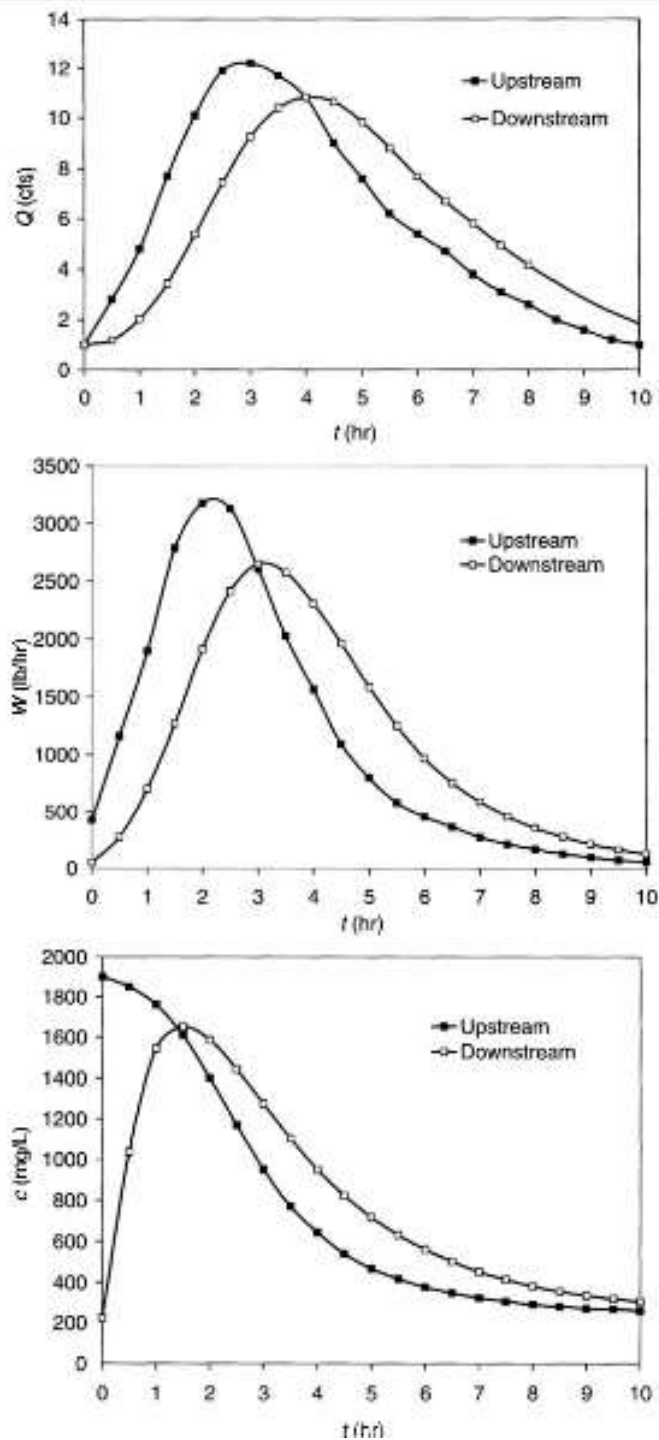
$$Q_D = 1.0 \text{ cfs}, W_D = 50 \frac{Ib}{hr} \text{ at } t = 0$$

به کمک روش روندیابی ماسکینگام با ضرائب C_0 ، C_1 و C_2 به ترتیب ۰،۱۰، ۰،۳۰ و ۰،۶۰ هیدروگراف های جریان، بار و غلظت را در پایین دست بازه محاسبه کنید (شکل ۱۹).

جدول ۱۵ مقادیر مرزی و نتایج مثال روندیابی رواناب آلوده حالت مانا [6]

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
t (hr)	Upstream			Downstream		
	Q_U (cfs)	c_U (mg/L)	W_U (lb/hr)	Q_D (cfs)	W_D (lb/hr)	c_D (mg/L)
0.0	1.00	1900	427	1.00	50.0	222
0.5	2.80	1850	1160	1.18	275	1040
1.0	4.80	1760	1900	2.03	704	1540
1.5	7.70	1610	2790	3.43	1270	1650
2.0	10.1	1400	3180	5.38	1920	1590
2.5	11.9	1170	3130	7.45	2420	1440
3.0	12.2	950	2610	9.26	2640	1280
3.5	11.7	770	2030	10.4	2570	1100
4.0	10.8	645	1570	10.8	2310	949
4.5	9.00	540	1090	10.6	1960	821
5.0	7.60	468	799	9.84	1590	717
5.5	6.20	417	581	8.80	1250	632
6.0	5.40	377	458	7.68	970	562
6.5	4.70	347	367	6.70	756	502
7.0	3.80	323	276	5.81	591	453
7.5	3.10	305	213	4.94	459	414
8.0	2.60	290	169	4.15	356	381
8.5	2.00	280	126	3.47	277	355
9.0	1.60	271	97.5	2.84	214	335
9.5	1.20	267	72.0	2.31	165	318
10.0	1.00	260	58.4	1.84	126	305

شکل ۱۸: نتایج روندیابی مثال رواناب آلوده



۲-۴ محاسبه و اندازه گیری دبی فاضلاب

دبی تولیدی به مجاری فاضلاب ممکن است ناشی از منابع زیر باشد:

- فاضلاب خانگی
- فاضلاب صنعتی
- نشت غیر مجاز از سیستم جمع آوری باران به فاضلاب رو در سیستم مجزا
- مقدار رواناب شهری وارد شده به فاضلاب رو در سیستم های ترکیبی

اساساً "خود رواناب شهری به ویژه در ابتدای رگبار بسیار آلوده بوده و نوعی فاضلاب محسوب می شود. اینکه سیستم شهر ترکیبی یا مجزا باشد بسیار مهم است. در هر صورت اگر قرار است به صورت ترکیبی فاضلاب ها با رواناب پاک یا آلوده شهری منتقل شوند باید این موضوع شامل حجم و دبی رواناب و آلاینده ها و دبی فاضلاب در طراحی ها لحاظ شود.

فاضلاب خانگی

به طور کلی باتوجه به میزان مصرف آب خانگی بخشی از آب مصرف شده به صورت فاضلاب در می آید. این نسبت به طور کلی برای هر منطقه ثابت است و میتوان هر منطقه رژیم آن را بر اساس اندازه گیری با مولینه مشخص نمود. بخشی از آب لوله کشی برای شستشوی خیابان و آبنماها، آبیاری فضای سبز و بخشی به صورت تبخیر از کولر و .. تلف می شود که این موارد حدود ۱۲ تا ۱۷ درصد می باشد. بخشی نیز به صورت نشت از شبکه تلف می شود که در کشورهای صنعتی ۸ تا ۱۳ درصد و در ایران حتی تا ۵۰ درصد نیز گزارش شده است. لذا آب برگشتی فاضلاب خانگی ممکن است به حدود ۴۰ درصد نیز برسد. علاوه بر این، نوسانات شبانه و روزانه فاضلاب و حداکثر آن در طول یک دوره برای طراحی ها لازم است. البته ممکن است بخشی از مناطق هنوز دارای شبکه فاضلاب نباشند و به صورت چاه جذبی دفع فاضلاب شوند. لذا در این حالت ضریب بهره برداری از شبکه در طراحی نیاز است. جهت طراحی شبکه توجه به رشد جمعیت نیز مهم است. محاسبات نرخ رشد و معادلات مربوطه در مرجع ۱ همین مولفین ارائه شده است. جدول ۱۶ میانگین مصرف سرانه مردم را نشان داده است.

جدول ۱۶ میانگین مصرف سرانه مردم در مناطق مختلف (۱۱)

درصد خالص مصرف های خانگی	میزان مصرف آب برای هر نفر در روز به لیتر		جمعیت شهر بر حسب نفر
	کشورهای در حال رشد و کم آب	کشورهای مرفه و صنعتی پرآب	
۸۰ - ۶۰	۱۰۰ - ۸۰	۲۰۰ - ۱۵۰	کمتر از ۱۰ هزار
۶۰ - ۴۰	۱۵۰ - ۱۰۰	۲۵۰ - ۲۰۰	بین ده هزار تا بیست هزار
۵۵ - ۳۵	۲۰۰ - ۱۵۰	۴۰۰ - ۲۵۰	بیست هزار تا صد هزار
۵۰ - ۳۰	۳۰۰ - ۲۰۰	۵۰۰ - ۴۰۰	بیش از ۱۰۰ هزار

فاضلاب صنعتی

در اینجا دو گروه بنگاه اقتصادی داریم. صنایع کوچک و بزرگ. در صنایع و کارگاه های کوچک مانند آرایشگرها، آهنگری ها، تعمیرگاه اتومبیل ها و .. مانند فاضلاب خانگی و درصدی از جدول ۱۶ لحاظ می شوند. البته اگر در منطقه هتل های بزرگ و دانشگاه ها باشند که هر سال دارای مهمانی و همایش های بزرگی باشند باید بازای هر نفر به صورت مجزا محاسبه و وارد محاسبات شود. برای کارخانه و صنایع بزرگ باید مقدار آب برگشتی محاسبه شود و یا به صورت جمعیت معادل برآورد شود. در این خصوص جداول تجربی وجود دارد که از مرجع ۱۱ می توان استفاده نمود.

آمیخته شدن آب باران با فاضلاب

در سیستم های مجزا ممکن است بخشی از آب باران از اتصالات نامناسب ناودان ها یا از ادم روهای (منهول) کف خیابان وارد شبکه فاضلاب خانگی شود. این مقدار بسته به سوراخ های منهول و شدت رگبار ممکن است از ۱ تا ۳ لیتر در ثانیه متفاوت باشد. لذا این مقدار ممکن است بین ۱۰ تا ۳۰ درصد فاضلاب خانگی تغییر کند.

مقدار رواناب شهری وارد شده به فاضلاب رو در سیستم های ترکیبی

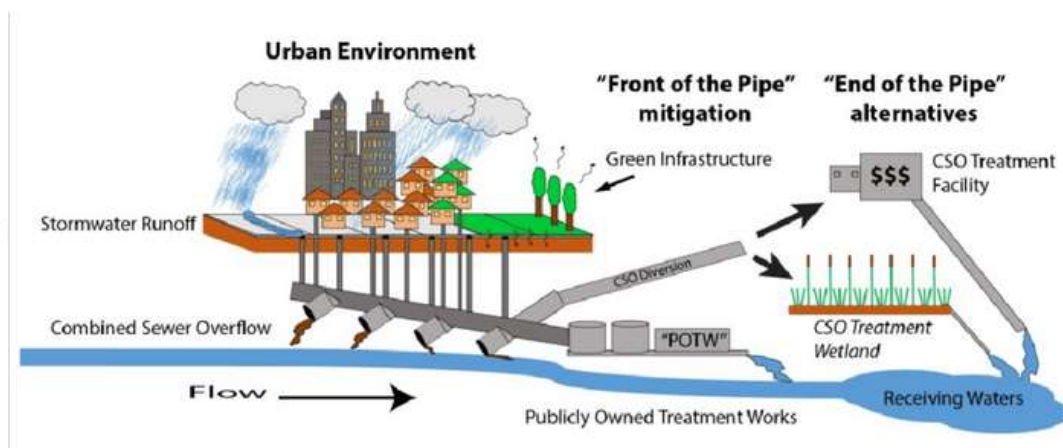
محاسبات کامل این بند شامل موارد اصلی بندهای کتاب حاضر بود که در صورت ترکیبی بودن سیستم باید وارد محاسبات طراحی شبکه جمع آوری فاضلاب شود.

اندازه گیری فاضلاب

روش ها و اصول اندازه گیری مشابه روش های اندازه گیری هیدرولوژیکی است که در بند فصل اول این کتاب ذکر شد. به طو کلی مقدار فاضلاب بر اساس مبنای میزان آب مصرفی واحد صنفی مشخص می شود و لذا از مولینه استفاده نمی شود. اما در صورتیکه نیاز به اندازه گیری باشد باید به کمک ابزار مولیه و یا روش های خود کار در مسیر فاضلاب، مقطع اندازه گیری مانند پارشال فلوم نصب و واسنجی نمود.

این صفحه خالیست

فصل ۳ سازه های جمع آوری و مدیریت رواناب شهری



نمایش سیستم ترکیبی مدیریت جمع آوری رواناب و فاضلاب

۳-۱ سیستم های ترکیبی و مجزا

به طور کلی اهمیت جمع آوری فاضلاب و به ویژه با سیستم زیرزمینی وقتی مشخص شد که انواع شیوع بیماری ها به واسطه فاضلاب ها توسعه پیدا کرد. قدیمی ترین سیستم کانالیزه و جمع آوری شبکه های جمع آوری فاضلاب (اگو) مربوط به ۷۰۰۰ سال پیش در آثار تمدن هندیان مشخص شده است. سیستم اگو در شهر پاریس در سال ۱۷۸۹ ساخته شده است. در ایران در گذشته نه چندان دور به شکلی بوده که هنوز هم این شرایط در اغلب شهرها مانند تهران وجود دارد. حالت اول مربوط به مناطق با سطح سفره پایین و بافت درشت است که سیلاب های آلوده شهری به رودخانه وارد می شدند و با ایجاد چاه جذبی (Leaching pits) مانند نقاط مختلف تهران فاضلاب دفع می شده است (جمع آوری ناقص). حالت دوم مربوط به زمین های بافت ریز و سطح سفره بالا بوده که به کمک رودخانه های منطقه و شیب منطقه دفع فاضلاب صورت می گرفته است. اگر در این مناطق شیب مناسب نبود به کمک ایجاد چاه های فاضلاب و لجن کش دستی این فاضلاب به مناطق مناسب دفع می شد. طی ۴۰ تا ۵۰ سال اخیر شهرهای اصفهان و اهواز و بخش کمی از تهران در حال توسعه سیستم های اگو مدرن هستند.

جمع آوری کامل ممکن است به شکل دو سیستم مجزا (Sepatate) یا درهم (Combined) باشد. به طور کلی هزینه اجرای شبکه های لوله کشی و کانالیزه کردن سیستم درهم یا ترکیبی فاضلاب و سیلاب رو کمتر می باشد ولی مسئله هزینه و حجم تصفیه آب و آلودگی محیط زیست نیز باید بررسی شود. در این حالت می توان با رگلاتورهایی مقدار فاضلاب و سیلاب را در زمان سیل که زیاد می شوند به سمت رودخانه هدایت و کنترل نمود که این مسئله باعث آلودگی بیشتر محیط زیست نیز می شود. در شهرهای مدرن سیستم لوله کشی برای آب حمام و آبیاری و مصرف شرب جدا شده است که این مورد و شرایط توپوگرافی می تواند در انتخاب نوع سیستم دفع موثر باشد. همچنین در روش ترکیبی باید سیستم بزرگتر طراحی شود و لذا این مسئله باعث افزایش احتمال جمع شدن و ته نشین شدن رسوبات معلق در شرایط جریان پایین و به ویژه مناطق خشک کم بارش می گردد.

به طور کلی در ایران شاید در مناطقی که رودخانه های طبیعی باشند و بارش کم باشد بهتر باشد سیستم سیلاب رو مجزا از سیت فاضلاب رو باشد تا فرصت تصفیه مناسب تر فاضلاب نیز فراهم شود. زیرا در سیستم های ترکیبی ممکن است به دلیل رگبار و حجم زیاد سیلاب، زمان ماند تصفیه پایین بیاید. به طور کلی ممکن است با احتیاط برای مناطق شمالی (مازندران و گیلان) کشور که تعداد روز بارندگی زیاد دارند مشروط به توجه ویژه به آلودگی سیستم طبیعت، از روش درهم استفاده شود. با این وجود در صورت طراحی یک سیستم مناسب مانند شکل شماتیک بالا، می توان از سیستم های ترکیبی بیشترین بهره را نیز تحت شرایط مناسب مهندسی برد.

۲-۳ سازه های زهکشی رواناب (Stormwater drainage strutures)

مهمترین سازه های زهکشی شامل گاتر ها یا نهرهای کوچک مثلثی کنار خیابان ها، دریچه های نرده ای، و سپس سیلاب رو ها هستند. سیلاب رو ها شامل منهول های آدم رو جهت بازدید، لوله ها، درون ریزهای آب باران و برف، سیفون ها، سازه های انتقال، مخازن آشغالگیر ابتدای مسیر، و مقسم های جریان می باشد. این مقسم ها از سرریز و اریفیس تشکیل می شوند. بعد از سیلاب رو ها که اغلب به صورت نسبتاً "پر بار رابطه مانینگ طراحی می وند، کانال ها زهکش جهت انتقال سیلاب به دریا، دریاچه یا رودخانه یا محل تصفیه طبیعی مانند دریچه های موقت منتقل می شوند. کالورت ها نیز باتوجه به شرایط مستغرق بالادست و پایین دست از دیگر زهکش های سیلاب شهری، در محل زیر گذرهای ریل راه آهن و بزرگراه

ها می باشد. جهت مطالعه جزئیات طراحی سازه های هیدرولیکی زهکش شهری می توانید به مرجع Brown, et al., 1996 یا از مرجع ۱ و ۱۴ از همین مولفین مراجعه کنید.

۳-۲-۱ زهکش های خیابان

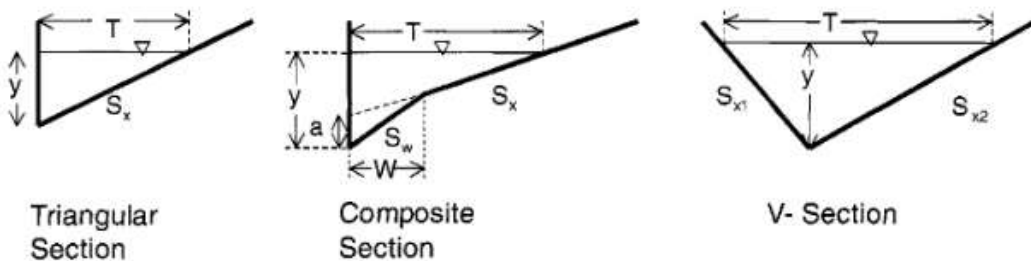
پس از شروع بارش، سطح پشت بام ها و ناودان ها محل جمع شدن باران بوده و پس از آن سیستم جمع آوری رواناب شهری ممکن است وارد جوی های کوچک مثلثی شکل کنار خیابان (gutter) و سپس در محل دریچه وارد منهول و سیستم سیلاب رو بزرگتر گردد. در صورت عدم طراحی و تراکم مناسب سیستم زهکشی، مسئله ترافیک و مزاحمت های رفت و آمد عابر در زمان بارندگی مشاهده می شود. اصول طراحی این کانال ها مانند هیدرولیک کانال های باز می باشد. در این حالت باتوجه به مقدار دبی طرح خیابان (جدول ۱)، و شیب هیدرولیکی مسیر، می توان مشخصات این جوی ها را طراحی نمود. اغلب نوع جریان در مسیرهای کم شیب نرمال فرض می شود. لذا معادله مانینگ قابل استفاده است.

جدول ۱: حداقل دوره بازگشت و شرایط پخش کنار خیابان جهت مدیریت کمی رواناب شهری

Road Classification	Design Frequency	Design Spread
High volume, divided, or directional		
< 70 km/hr (45 mph)	10-year	Shoulder + 1 m (3 ft)
> 70 km/hr (45 mph)	10-year	Shoulder
Sag point	50-year	Shoulder + 1 m (3 ft)
Collector		
< 70 km/hr (45 mph)	10-year	$\frac{1}{2}$ driving lane
> 70 km/hr (45 mph)	10-year	Shoulder
Sag point	10-year	$\frac{1}{2}$ driving lane
Local streets		
Low ADT*	5-year	$\frac{1}{2}$ driving lane
High ADT	10-year	$\frac{1}{2}$ driving lane
Sag point	10-year	$\frac{1}{2}$ driving lane

Note: ADT, average daily traffic.

Source: After Brown et al. (1996).

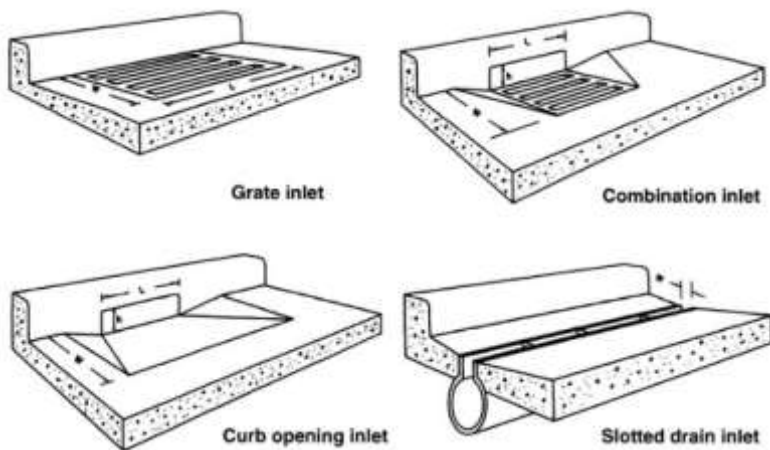


شکل ۱: انواع مقطع سازه های جمع کننده ابتدایی (گاتر) رواناب شهری

معادله اصلاح شده مانینگ برای حالت گاتر ثلثی به شکل زیر است. لذا برای هر مقطع هیدرولیکی نیاز به اصلاح شکل و لحاظ اثرات شعاع هیدرولیکی کم می باشد:

$$Q = \frac{k_n T^{8/3} S_x^{5/3} S_L^{1/2}}{2.64n}$$

Q دبی گاتر، k_n ثابت تبدیل که در سیستم متریک ۱ $m^{1/3}/s$ می باشد. T عرض بالا، n ضریب زبری مانینگ، S_x شیب عرضی و S_L شیب طولی کف می باشد. در شکل ۲ انواع دریچه (inlet) نمایش داده شده است.



After Johnson and Chang (1984).

شکل ۲: انواع اینلت

در طراحی اینلت ها باید بر اساس مقدار دبی رواناب و مقدار دبی گیرش دریچه (Q_i)، کارائی دریچه ارزیابی گردد:

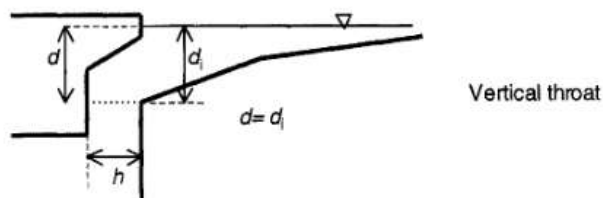
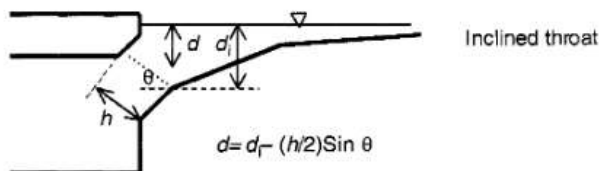
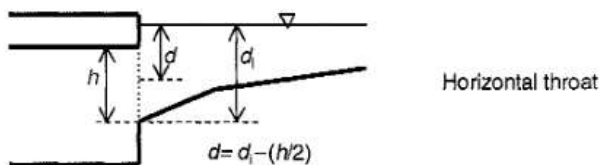
$$E = \frac{Q_i}{Q}$$

مقدار جریانی که از دریچه عبور نمی کند را دبی منحرف شده (Q_b) می نامند.

$$Q_b = Q - Q_i$$

بر این اساس می توان فاصله دریچه ها و تعداد و شرایط هیدرولیکی آنها را تعیین نمود.

اصول طراحی انواع گاتر و دریچه ها باتوجه به شکل آنها و لبه درون ریز (اریفیس شکل یا سرریز و ..) متفاوت خواهد بود (شکل ۳).



شکل ۳: انواع دهانه و شکل لبه دریچه

After Johnson and Chang (1984).

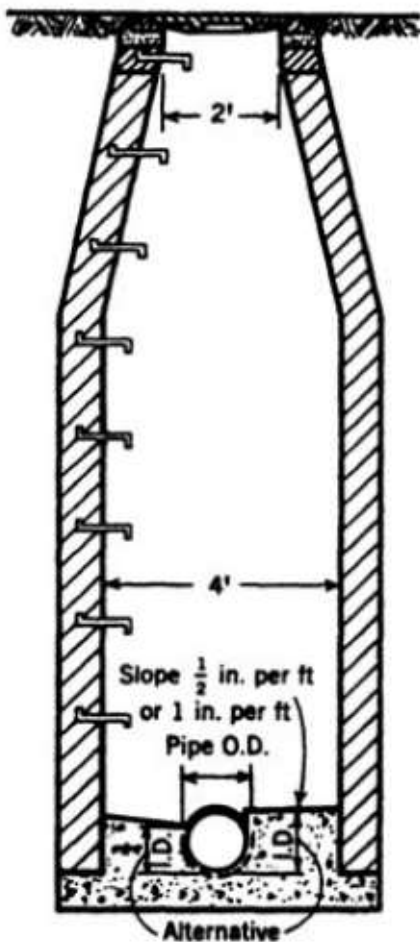
۲-۲-۳ سیستم سیلاب رو (Storm sewer)

پس از اینکه رواناب وارد دریاچه ها شد، جریان سیلاب شهری به کمک سیلاب روهای دفن شده منتقل می شوند. شرایط جریان اغلب از نوع آزاد است اگرچه ممکن است به صورت تحت فشار نیز در بیایند. اگر این شرایط در طراحی دیده نشده باشد باعث خفگی و پس زدن جریان و مشکلات جمع شدگی آب می شود. اصول طراحی در حالت آزاد مشابه هیدرولیک کانال های باز و در حالت تحت فشار مشابه لوله می باشد. این جریان در انتها ممکن است وارد دریاچه، رودخانه یا دریا و یا سیستم های ذخیره و جهت تصفیه و استفاده های مجدد شود. سیستم های سیلاب رو شامل اجزای دریاچه، منهول، مخازن یا چمبر و آشغالگیر، سازه های انتقال و اسپلتر و سیفون هستند. اصول طراحی هیدرولیکی هر یک از این سازه ها در کتب مکانیک سیالات و هیدرولیک کانال ها ارائه شده است (شکل ۴).

معادله مانینگ:

$$Q = \frac{k_n}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2}$$

A سطح جریان، R شعاع هیدرولیکی و S_f شیب اصطکاک
سایر پارامترها قبلاً "ارائه شده اند.



شکل ۴: مقطه شماتیک یک منهول و اجزای داخلی آن

۳-۲-۳ کالورت - پل ها و کانال زهکشی سطحی

اصول هیدرولیکی طراحی این سازه ها باتوجه به سرعت و تغییر سطح آب که ممکن است جریان نرمال نباشد و یا از نوع متغیر سریع مانند جریان در محدوده پایه پل ها باشد، متفاوت است. جریان کالورت ها ممکن است از نوع شرایط بحرانی و فوق بحرانی باشد که در صورت عدم توجه به ملاحظات طراحی، باتوجه به حساس بودن محل این سازه ها با جاده، تجارب نشان داده است که ممکن است باعث تخریب جاده به دلیل پدیده روگذری نیز باشد. به عنوان مثال اگر جریان داخل کالورت تحت فشار شود، این مسئله باعث افزایش فشار و نیروی بالارونده زیرگذر جاده و سپس تخریب کالورت و جاده خواهد شد. در خصوص پایه های پل مسئله کنش و فرسیاش به دلیل تنش برشی جریان ($\tau = \gamma RS$) مطرح می شود و اغلب حالت جریان شبیه پروفیل جریان روی سرریز ها همراه جریان ادی یا گردابی خواهد بود.

کانال های زهکشی بسیار متنوع هستند. انواع سطحی و زیرسطحی که با اهداف مختلف در سطح زمین های کشاورزی و شهری می توانند با توجه به نیاز و مسئله طراحی و اجرا شوند. به عنوان نمونه زهکش های زیرسطحی که به منظور افت سطح سفره طراحی می شوند نمونه ای از این سازه های جمع کننده هستند.

۳-۳ طراحی سیستم جمع آوری فاضلاب (Sewerage)

اصول طراحی سیستم های فاضلاب رو و اجزای سیستم و سازه ها مشابه بند سازه های زهکشی رواناب شهری با کمی تفاوت در خصوص اتوکلین بودن و مسئله بو و بهداشتی بودن سیستم می باشد. همچنین مسئله محاسبات بارهای استاتیکی ناشی از زمین و عبور وسایل نقلیه در لوله های مدفون فاضلاب و فاضلاب رو نیز یکسان است. جزئیات بیشتر در مرجع شماره ۱۱ کتاب جمع آوری فاضلاب مراجعه شود.

۳-۴ مدیریت کمی- کیفی رواناب شهری (BMPs)

اصول کلی مدیریت رواناب شهری و روستایی یکسان است. به عنوان نمونه اصول و مفهوم مهندسی ذخیره سیستم و مهندسی زمان تمرکز حوضه های شهری و روستایی یک کارکرد را دارد. این مفهوم میتواند در حوضه های شهری نیز استفاده شود. مثلاً "با ایجاد طول های زائد مسیر، ایجاد مخازن، بای پس، شکست هیدرولیکی و .. می توان نسبت به تغییر رفتار جریان از نظر آلودگی و دبی خسارتی سیل تصمیم گیری

نمود و نسبت به برنامه ریزی و انتخاب بهترین گزینه مدیریت رواناب تصمیم بهینه گرفت. توضیحات بیشتر در مرجع ۱ همین مولفین تشریح شده لذا در اینجا لیست برخی از روش ها ارائه می شود.

لیست برخی از روش های مدیریت رواناب و رواناب آلوده شهری

- توسعه مخازن طبیعی موجود و ساخت مخازن نگهداشت موقت و دائم (کمی-کیفی)
- روش های توسعه نفوذ خاک
- روش شکست هیدرولیکی
- طراحی مسیرهای انحراف سیل- بای پس
- زهکش فرانسوی
- ترانشه های کنترل کیفیت آب همراه گیاه های مناسب
- فیلترهای شنی تصفیه آب
- تالاب و پوشش گیاهی

اصول طراحی و مدیریت هریک از این موارد متفاوت است و در هر منطقه باتوجه به شرایط فیزیکی و نیاز می توان یک یا الفیقی از این روش ها را طراحی و مدیریت و بهره برداری نمود.

۳-۵ روش های خاص مدیریت رواناب شهری

مسائلی چون هیدرولیک پل در شرایطی که رودخانه ها از داخل شهر عبور می کنند حیاتی می شود. متأسفانه ساخت سازه ای پل صرفاً "مهم نیست. باید به محیط زیست و شرایط هیدرولیک رسوب و جریان نیز توجه نمود. در این خصوص توجه به آبخیزداری حوضه های مشرف، کنترل فرسایش و رسوب، نیز اهمیت دارد.

مسله برف می تواند در خصوص ایجاد رواناب مضاعف در صورتیکه تغییرات ناگهانی دما یا بارش گرم روی برف خوابیده در حوضه، ایجاد مسله کند و لذا در صورت نیاز باید در طراحی سیستم لحاظ شود. مسله استفاده مجدد از فاضلاب و تصفیه طبیعی آبخوانه (SAT)، تامین انرژی از گازهای فاضلاب، این روزها مورد توجه می باشد. در خصوص موارد بالا و پیش بینی و هشدار سیل و عدم قطعیت های محاسباتی و یا غیر محاسباتی مانند گرفتگی دهانه چشمه کالورت ها در اثر آت و آشغال، و نگاه کل نگر در برنامه ریزی سیستمی شهری خواننده می تواند به مراجع ۱ و مرجع ۱۳ از همین مولفین مراجعه نماید.

لیست برخی از مسائل خاص که می بایست در مطالعات هیدرولوژی شهری توجه شود:

- مهندسی رودخانه های درون شهری
- هیدرولیک پل، کالورت و سایر سازه های کنترل سیل
- کنترل فرسایش رودخانه ای و کشتیرانی
- آبخیزداری شهری (مدیریت یکپارچه سیستم) (ISM)
- آب گرفتگی و اثر سفره آبهای زیرزمینی
- اثر برف (رواناب و آلودگی)
- تامین انرژی
- استفاده مجدد از رواناب و فاضلاب با تصفیه طبیعی
- پیش بینی و هشدار سیل
- ملاحظات اجرا - بهره برداری - نگهداری شبکه و زیست محیطی
- عدم قطعیت ها
- تصفیه آب و فاضلاب (Wastewater treatment)

۱. فرهاد دلیری، حسن سید سراجی (۱۳۹۸)، مدلسازی آب و محیط زیست (کنترل سیل، تامین آب، مدیریت آب زیرزمینی)، حوضه های شهری و روستایی. محاسبات عددی، چاپ دوم، حمایت شرکت مهندسين آبسام (طرح و ساخت)، (www.absam.ir).
2. Michael B. Tobey & et.al., (2019). "Urban Systems Design: A Conceptual Framework for Planning Smart Communities". *Smart Cities* 2019, 2(4), 522-537.
3. Chow. V. T. Maidment. D. r., Mays. L. W. (1988). "Applied hydrology" McGraw.
۴. فرهاد دلیری، سرپرست پروژه تامین، طراحی و انتقال آب خام فضای سبز شهرداری کوت عبدا..اهواز، شرکت آبسام.. ۱۴۰۰.
۵. دلیری، فرهاد؛ خلقی، مجید (۱۳۸۸)، "بررسی اهمیت تیپ رگبار و گیرش اولیه در تعیین دبی اوج سیلاب"، "مجله تحقیقات انجمن منابع آب ایران، گزارش فنی، 5 (۳): ۱۹-۲۰. SID.
6. Akan. O.A., Houghtalen J. R. "Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality" 2003.
7. Daliri, F., Seraji, H.S., Kholghi, M., & Ahmadi, H. (2011), "Soil Hydrologic group Detection Based on Geomorphology Facieses and Slop," (Case Study: West of Tehran). *Desert, ISI.16(1):69-75.* (<http://jdesert.ut.ac.ir>).
۸. دلیری، فرهاد، ۱۳۸۶. مطالعات فرسایش و رسوب سید شیرین دره، شرکت وزنا (روش MPSIAC).
۹. دلیری، فرهاد، ۱۳۸۷. مطالعات علاج بخشی کیفی سد شرب ایلام، شرکت مهتاب قدس.
۱۰. دلیری فرهاد. ۱۳۹۱، محاسبات رواناب ورودی به شهر سنگان، کاوش پی مشهد. شهرداری سنگان.
۱۱. منزوی، م.ت. جمع آوری فاضلاب جلد اول سال ۱۳۸۵، ۲۵۰ ص. دانشگاه تهران.
12. Brown, S. A, Setin, S. M., and Warnner, J.C. (1996). *Urban drainage design manual, hydraulic engineering*, No 22. Federal Highway Adminisstration, Washington DC.
13. Farhad.Daliri. "Uncertainty in flood forecasting modeling", 250p. 2020.www.absam.ir.
14. Farhad. Daliri, "Principle of damming" 50p, 2020. www.absam.ir.



AbSam
EPC Co.
Research, Design & Construction
www.ahsam.ir

Environmental & Water Modeling
Principle of Urban Hydrology
(Urban Runoff – Hydraulics – Stormwater Pollution Management)

2 th EDIT 2022

BY:

Dr. Farhad Daliri , Dam Consultant & Hydrologist

Instructor
Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University

Dr. Hassan Seyed Seraji , Dam Consultant & Fluid Mechanics

Assistant Professor
Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University



AbSam EPC Co.

Research, Design & Construction

Environmental & Water Modeling

Principle of Urban Hydrology

(Urban Runoff- Hydraulics – Stormwater Pollution Management)

2 th EDIT 2022

By:

 **Dr. Farhad Daliri** Dam Consultant and Hydrologist
Instructor Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University
info@absam.ir

 **Dr. Hassan Seyed Seraji** Dam Consultant and Fluid Mechanics
Assistant Professor Water & Environment Eng. Campus of
Shahid Beheshti University
mhseraji@pwt.ac.ir

شرکت مهندسين آپسام (فرج و ساخت)

شرکت مهندسين مشاور و پيمانکار آپسام (فرج و ساخت) از ترکيب شرکت مهندسين مشاور مهار سيل گشتمان (سال ۱۳۸۵) با شرکت پيمانکار اينکار کارون (سال ۱۳۷۵) در سال ۱۳۹۶ تاسيس شده است. زمينه های کاری:

۱. مشاور و پيمانکار آب - انرژی و محيط زیست (سد، رودخانه، لغت و گاز، آبياری و ...)
۲. مشاور و پيمانکار راه و ساختمان
۳. نقشه برداری و GIS , IT
۴. تهیه، نصب و راه اندازی ادوات و ابزار و هوشمندسازی
۵. صدور خدمات فنی و مهندسی ارزش و روابط بين الملل

جزئیات در سایت رسمی شرکت www.absam.ir قابل دسترسی می باشد.

“کليه حقوق مادی و معنوی اين کتاب متعلق به شرکت مهندسين آپسام می باشد.”



شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۳-۲۱-۵

Free Download: www.absam.ir

مدلی آب و محیط زیست

مؤلفان: دکتر فرهاد دلیری، دکتر حسن سید سراجی

