

## بررسی رواناب سطحی و زیرسطحی دامنه‌های حوزه‌های آبخیز با خاک ماسه لومی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز شهر استهبان

تورج سبزواری<sup>\*</sup>، مهدی مخبری<sup>۱</sup> و صادق حسینی خطبه‌سرا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران، <sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران و <sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

### چکیده

حوزه‌های آبخیز از یکسری دامنه‌های شیبدار تشکیل شده که رواناب سطحی و زیرسطحی آن‌ها به وسیله شبکه آبراهه‌ها به خروجی حوضه منتقل می‌شود. در حوضه‌های با دامنه‌های با نفوذپذیری بالا و پوشش گیاهی مناسب، مقدار رواناب زیرسطحی از اهمیت بالاتری برخوردار می‌شود. در این تحقیق، از یک مدل آزمایشگاهی باران‌ساز هیدرولوژیکی به طول ۱/۹۲ متر و عرض یک متر و عمق ۰/۳۵ متر استفاده شد که مقادیر جریان سطحی و زیرسطحی به وسیله دو سرریز مختلف اندازه‌گیری شد. خاک تحت آزمایش از خاک‌های انجیرستان‌های شهر استهبان که از نوع ماسه لوم‌دار است انتخاب شد. آزمایش‌ها تحت چهار زاویه شیب ۰/۱، سه، شش و نه درجه و تحت بارش‌های ۳۱/۷۳، ۴۷/۶ و ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت انجام گرفت. بر اساس نتایج، تغییرات شیب صفحات از ۰/۱ به سه درجه باعث کاهش ۵۰ درصدی جریان زیرسطحی و افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی جریان سطحی در بارش‌های مختلف شد ولی از شیب سه به نه درجه تأثیر محسوسی در دو جریان مشاهده نشد و در تغییرات شیب شش به نه درجه کاهش نه درصدی جریان زیرسطحی و دو درصدی جریان سطحی مشاهده شد. افزایش شدت بارندگی باعث افزایش مقادیر هیدروگراف جریان سطحی و زیرسطحی شد. نسبت جریان سطحی به زیرسطحی به‌طور متوسط بین ۷/۵ تا ۱۴/۵ برابر جریان زیرسطحی در سه بارش برای خاک ماسه‌ای لوم‌دار تغییر کرد. با افزایش شیب، مقدار جریان سطحی بیشتر و نفوذ کمتر می‌شود. در این تحقیق ضمناً دو معادله رگرسیونی غیرخطی برای محاسبه ماکزیمم سطحی و زیرسطحی ارائه شد که تابعی از طول، شیب و شدت بارندگی دامنه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان سطحی، جریان زیرسطحی، خاک ماسه‌ای لوم‌دار، شبکه آبراهه، معادله رگرسیونی غیرخطی

### مقدمه

سطحی حوضه را مشکل می‌سازد. یکی از مشکلات هیدرولوژیست‌ها در تخمین رواناب حوزه‌های آبخیز تخمین درست بارش مازاد است که به نفوذ ارتباط دارد. بیشتر مدل‌های بارندگی رواناب از دقت مناسبی برای پیش‌بینی رواناب برخوردار هستند به شرطی که بارش مازاد به‌عنوان ورودی مدل به‌صورت دقیق به

بارندگی که بر روی سطح زمین می‌بارد، قسمتی از آن نفوذ می‌یابد و باعث ایجاد جریان زیرسطحی شده و بقیه منجر به ایجاد رواناب سطحی می‌شود. نفوذ یک پدیده پیچیده است که به‌علت غیریکنواختی نوع خاک و پوشش گیاهی در سطح حوضه تخمین دقیق رواناب

اصلی رواناب از نوع دانی- بلاک می‌باشد و جریان سطحی در پایین‌دست دامنه‌ها در نزدیکی نهرها تشکیل می‌شود و جریان زیرسطحی در کل دامنه‌ها در جریان است (Dunne و Black، ۱۹۷۰؛ Dunne، ۱۹۷۸؛ Eshleman و همکاران، ۱۹۹۳؛ Fujieda و همکاران، ۱۹۹۷). بحث جداسازی منطقه اشباع از غیراشباع مسئله بسیاری مهمی است که تعیین کننده میزان جریان سطحی و زیرسطحی دامنه‌ها می‌باشد (Freeze و Harlan، ۱۹۶۹؛ Freeze، ۱۹۷۱، ۱۹۷۲a و ۱۹۲۷b؛ Sabzevari و همکاران، ۲۰۱۳؛ Sabzevari و همکاران، ۲۰۱۴).

در گذشته، تحقیقات وسیعی بر روی تأثیر شیب دامنه‌ها بر جریان سطحی و نفوذ انجام شده است و بعضی از نتایج با یکدیگر در یک راستا نبوده و متفاوت هستند. لذا، تحقیقات بیشتری را در این زمینه می‌طلبند. Philip (۱۹۹۱) یکسری معادلات ریاضی برای پدیده نفوذ در دامنه‌های شیب‌دار ارائه نمود. ایشان نشان داد که مقدار نفوذ با افزایش زاویه شیب کاهش می‌یابد.

Sharpley و Williams (۱۹۹۰) به بررسی تأثیر شیب دامنه‌ها بر پارامتر نفوذ عدد منحنی در مدل نفوذ SCS پرداختند و معادله‌ای برای تصحیح عدد منحنی در شیب ارائه دادند. Morbidelli و همکاران (۲۰۱۵) در یک تحقیقی تأثیر شیب دامنه‌های حوضه بر میزان دبی بیشینه جریان زیرسطحی مورد بررسی قرار دادند. زاویه شیب دامنه‌ها بین صفر تا ۱۰ درجه در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج مقدار بیشینه جریان سطحی در زاویه یک درجه به بیشینه جریان زیرسطحی در زاویه ۱۰ درجه حدود چهار است.

مهمترین اهداف این مقاله، بررسی نسبت جریان سطحی و زیرسطحی در یک رویداد بارندگی و ارتباط آن با شدت بارندگی، شیب و طول دامنه در حوزه آبخیز شهر استهبان، جداسازی جریان سطحی و زیرسطحی از کل بارندگی، بررسی تأثیر شیب بر رواناب سطحی و زیرسطحی دامنه‌های حوزه آبخیز و ارائه معادلاتی که مقدار بیشینه جریان سطحی و زیرسطحی را ارائه دهند، می‌باشد.

آن‌ها داده شود. به‌طور مثال، مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای قابلیت تخمین رواناب سطحی و زیرسطحی کل حوضه را دارا هستند و هیتوگراف بارش مازاد ورودی این مدل‌ها هستند (Lee و Chang، ۲۰۰۰؛ Sabzevari و همکاران، ۲۰۱۳؛ Sabzevari و Noroozpour، ۲۰۱۴).

محاسبه جریان سطحی حوزه‌های آبخیز برای پیش‌بینی رواناب سطحی در محاسبه سیلاب طراحی کاربرد وسیعی دارد. میزان رواناب مستقیم حوضه‌ها از سه مولفه جریان سطحی، جریان زیرسطحی و دبی پایه تشکیل شده است. حوضه‌هایی که دارای خاک نفوذپذیر هستند و پوشش گیاهی بیشتری دارند، ممکن است از جریان زیرسطحی بیشتری برخوردار باشند و حتی ممکن است، مقدار جریان زیرسطحی تشکیل شده از مقدار جریان سطحی به وجود آمده بیشتر باشد. تخمین جریان زیرسطحی دامنه‌های حوزه‌های آبخیز به علت اینکه این جریان تابعی از مشخصات خاک، پوشش گیاهی، رطوبت اولیه و مقدار شدت نفوذ بارندگی به داخل خاک و عمق خاک می‌باشد از پیچیدگی خاصی برخوردار است.

انجام مطالعات آزمایشگاهی برای تخمین هیدروگراف جریان زیرسطحی دامنه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به منطقه خشکی که ایران در آن قرار دارد، تخمین مقدار نفوذ رواناب ناشی از بارندگی‌ها در پیش‌بینی سرعت تغذیه منابع زیرزمینی و برنامه‌ریزی هدفمند برای بهره‌برداری از آن از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

در زمینه نفوذ و جریان زیرسطحی<sup>۱</sup>، تحقیقات وسیعی به‌وسیله Beven (۲۰۱۲)، Montgomery و Dietrich (۲۰۰۲)، Fiori و همکاران (۲۰۰۷) و Morbidelli و همکاران (۲۰۱۵) انجام گرفته است. در بسیاری از حوزه‌های آبخیز با پوشش گیاهی مناسب و خاک نفوذپذیر مقدار نفوذ و تغذیه به آبخوان بالا می‌باشد و جریان زیرسطحی از اهمیت بالایی برخوردار است به‌طوری که اگر سنگ بستر نزدیک سطح خاک باشد، رواناب زیرسطحی همراه رواناب سطحی وارد نهرها می‌شود. در حوضه‌های تپه‌ای شیب‌دار مکانیسم

<sup>1</sup> Deep flow

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی باران‌ساز به تخمین هیدروگراف جریان سطحی و زیرسطحی یک دامنه حوضه با شیب‌ها و شدت بارش‌های متفاوت پرداخته شده است تا رابطه مطلوبی بین شدت بارش و شیب دامنه‌ها و هیدروگراف‌های جریان سطحی و زیرسطحی حاصل شود. چهار شیب

۰/۱، سه، شش و نه درجه با سه شدت بارندگی بارش‌های ۳۱/۷۳، ۴۷/۶ و ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد. دستگاه باران‌ساز طراحی شده قابلیت اندازه‌گیری جریان سطحی و زیرسطحی داخل خاک را به‌صورت جداگانه دارد. شکل ۱ نمایی کلی از دستگاه باران‌ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی کلی از دستگاه باران‌ساز هیدرولوژی (آزمایشگاه آب و هیدرولیک دانشگاه آزاد واحد استهبان)

دستگاه باران‌ساز مورد آزمایش دارای منبع تغذیه آب، پمپ آب، دبی‌سنج جهت تنظیم مقدار شدت بارش بیشینه ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت، شیرآلات تنظیم جریان آب، نازل‌های بارش، محفظه خاک (با قابلیت تنظیم بیشینه شیب ۱۰ درجه)، پیزومترهای سنجش ارتفاع آب درون خاک، سینی جداکننده جریان سطحی و زیرسطحی، خروجی‌های جریان سطحی و زیرسطحی، محفظه‌های مدرج برای سنجش مقدار دبی خروجی، مخازن جمع‌آوری رواناب و جریان زیرسطحی خارج شده از دستگاه بوده و دستگاه با خاک زمین‌های کشاورزی انجیرستان شهر استهبان با بافت ماسه لوم‌دار با ۸۵/۶ درصد ماسه، ۱۴/۱۳ درصد لای و ۰/۲۷ درصد رس پر شد.

طول مخزن خاک ۱۹۲ و عرض آن ۱۰۰ سانتی‌متر و عمق خاک ۳۵ سانتی‌متر بوده و یک لایه

زهکش شن در کف مخزن ریخته شد. ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در آزمایشگاه خاک ۳/۶۷ سانتی‌متر بر ساعت و جریان سطحی و زیرسطحی به‌وسیله دو سرریز جداگانه اندازه‌گیری شد. شکل ۳، تصویر شماتیک دستگاه باران‌ساز را نشان می‌دهد.

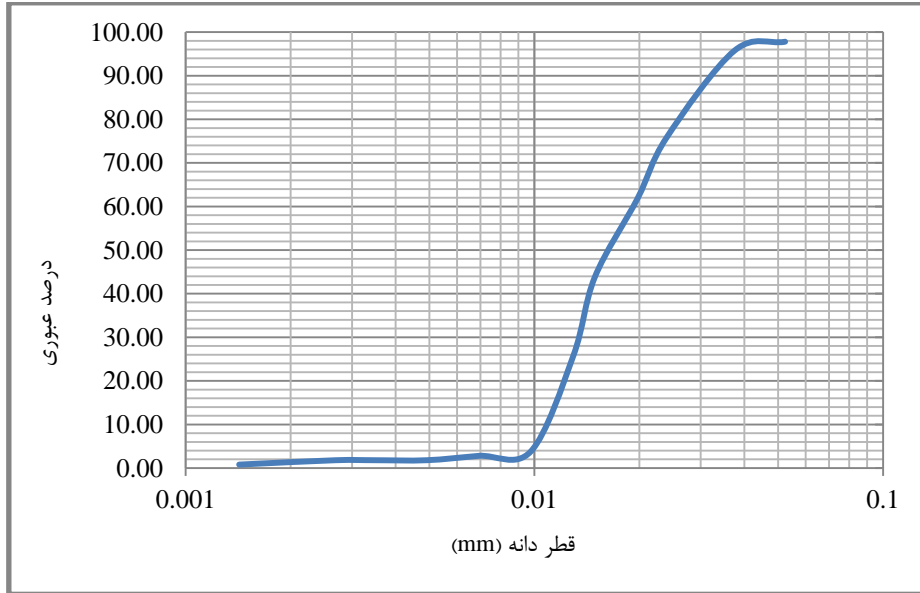
برای شروع آزمایش، می‌باید میزان پاشش نازل‌های بارندگی واسنجی شده و شدت بارندگی دستگاه بر اساس دبی‌سنج ورودی مشخص شود. جدول ۱، میزان دبی ورودی به دستگاه و میزان شدت بارش را نشان می‌دهد.

## نتایج و بحث

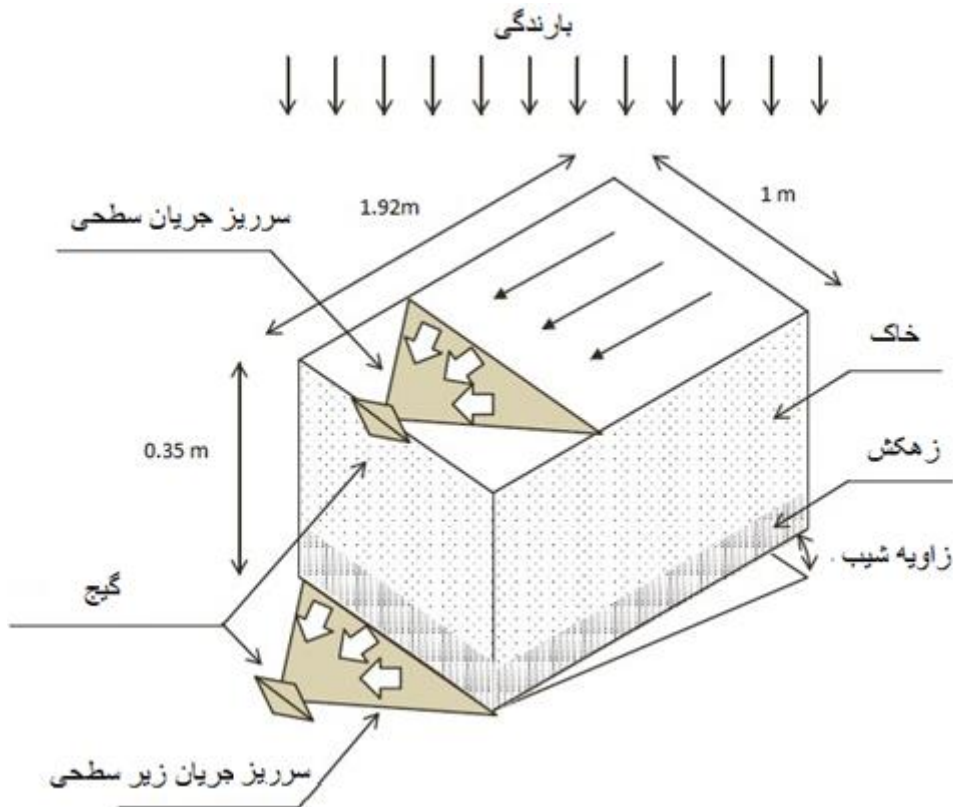
**تخمین رواناب سطحی:** به‌طور کلی مکانیسم رواناب به دو صورت است. الف) مکانیسم هورتونی و ب) مکانیسم دانی بلاک. در مکانیسم هورتونی سطح خاک

به سمت خروجی دامنه در منطقه اشباع صورت می‌گیرد. رواناب سطحی بر روی سطح خاک ایجاد می‌شود. شکل‌های ۴ الی ۶، هیدروگراف‌های سطحی جریان را با تغییرات شیب تحت بارش‌های مشابه را نشان می‌دهند.

از بالا اشباع می‌شود و جریان نفوذ کرده به خاک باعث ایجاد جریان زیرسطحی می‌شود. در این تحقیق مکانیسم جریان نیز به صورت هورتونی است، چون پروفیل رطوبتی خاک ابتدا کل عمق خاک را طی می‌کند و بعد از اشباع شدن خاک جریان در جهت شیب



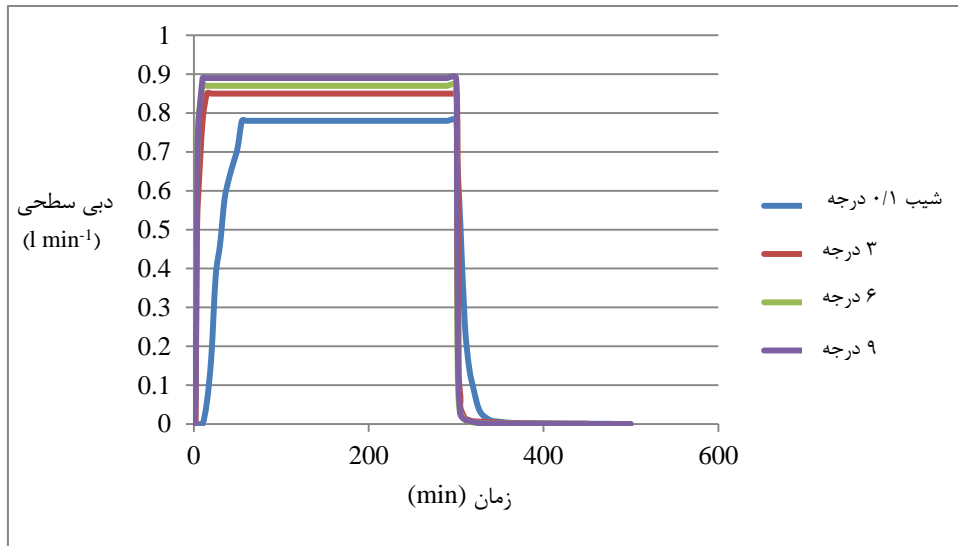
شکل ۲- نمودار دانه‌بندی قسمت ریز دانه خاک



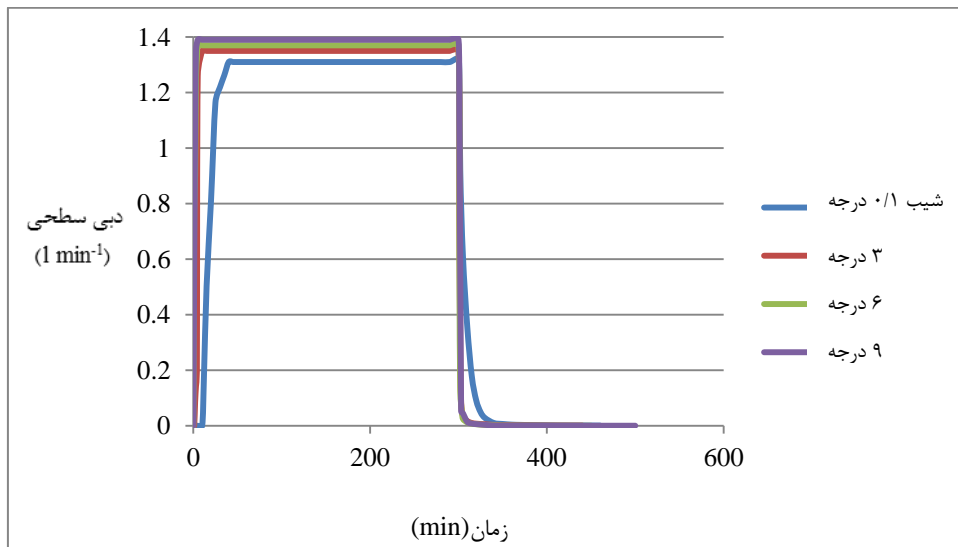
شکل ۳- تصویر شماتیک دستگاه باران‌ساز

جدول ۱- تعیین شدت بارندگی دستگاه براساس دبی ورودی

دبی ورودی (میلی‌متر بر دقیقه)	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۵	۲	۳	۴
شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	۶/۳۵	۱۲/۶۹	۱۹/۰۴	۲۵/۳۸	۳۱/۷۳	۳۸/۰۸	۴۷/۶	۶۳/۴۶	۹۵/۱۹	۱۲۶/۹۲



شکل ۴- تغییرات دبی جریان سطحی تحت شیب‌های مختلف و بارش ۳۱/۷۳ میلی‌متر بر ساعت



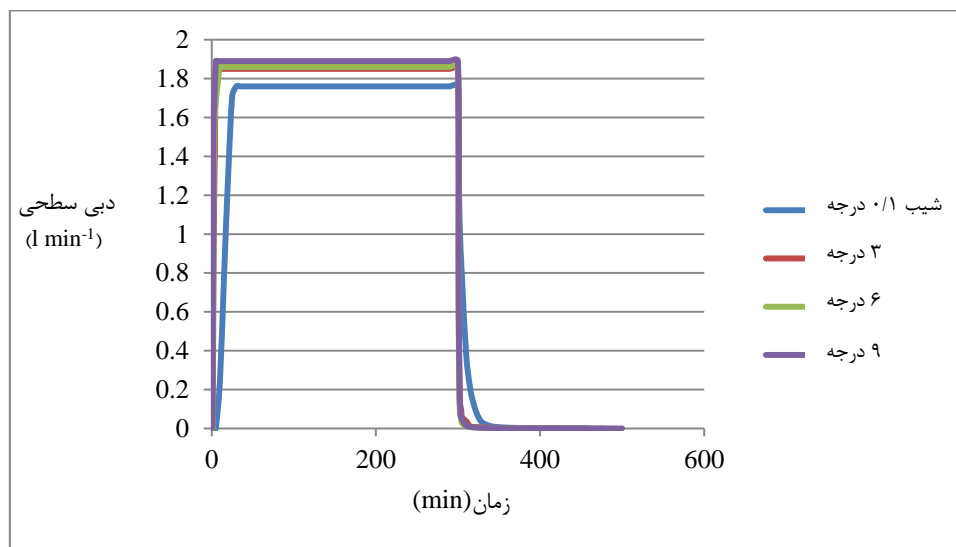
شکل ۵- تغییرات دبی جریان سطحی تحت شیب‌های مختلف و بارش ۴۷/۶ میلی‌متر بر ساعت

محاسبه هیدروگراف جریان زیرسطحی: تخمین رواناب زیرسطحی در طبیعت کار سختی است و برای این منظور اندازه‌گیری جریان زیرسطحی در طول یک دامنه با ابعاد کم صورت می‌گیرد. رواناب سطحی و زیرسطحی با هم ترکیب می‌شود و به‌عنوان رواناب مستقیم وارد رودخانه اصلی می‌شود. جداسازی جریان

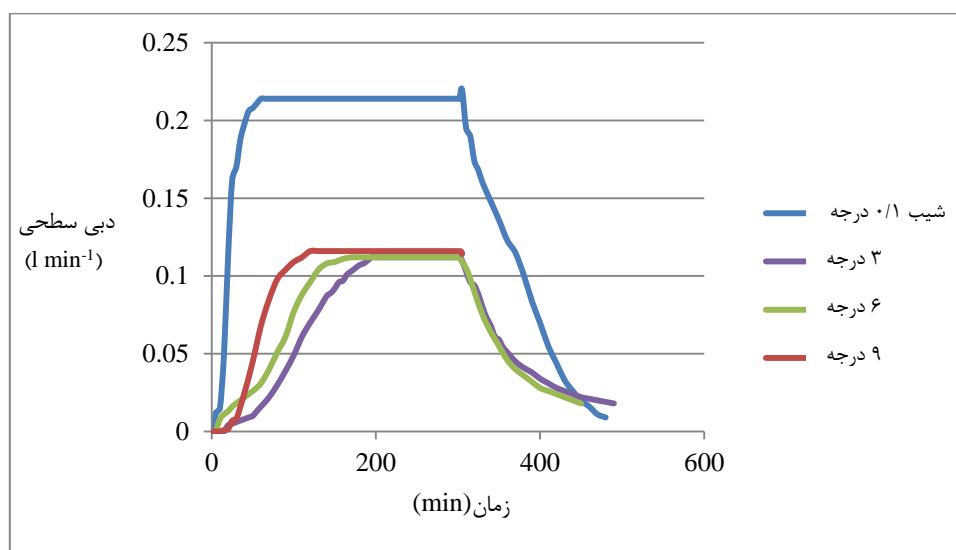
بر اساس نتایج، دبی سطحی از شیب افقی به شیب سه درجه به‌طور متوسط بین ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش نقطه ماکزیمم را به دنبال دارد. ولی تغییرات دبی سطحی از شیب سه به شش درجه و نه درجه بسیار کم می‌باشد. هر چه مقدار شدت بارندگی بیشتر شود، مقدار دبی ماکزیمم سطحی افزایش می‌یابد.

مقدار بارش مازاد دارد. شکل‌های ۷ الی ۹ مقایسه تغییرات بین هیدروگراف‌های زیرسطحی را با تغییرات شیب تحت بارش‌های مشابه را نشان می‌دهند.

سطحی از زیرسطحی همیشه یکی از رویاهای هیدرولوژیست‌ها می‌باشد. برای جداسازی جریان سطحی و زیرسطحی با فرض این که کل جریان زیرسطحی وارد نهر شود، بستگی به مقدار نفوذ و



شکل ۶- تغییرات دبی جریان سطحی تحت شیب‌های مختلف و بارش ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت



شکل ۷- تغییرات دبی جریان زیرسطحی تحت شیب‌های مختلف و بارش ۳۱/۷۳ میلی‌متر بر ساعت

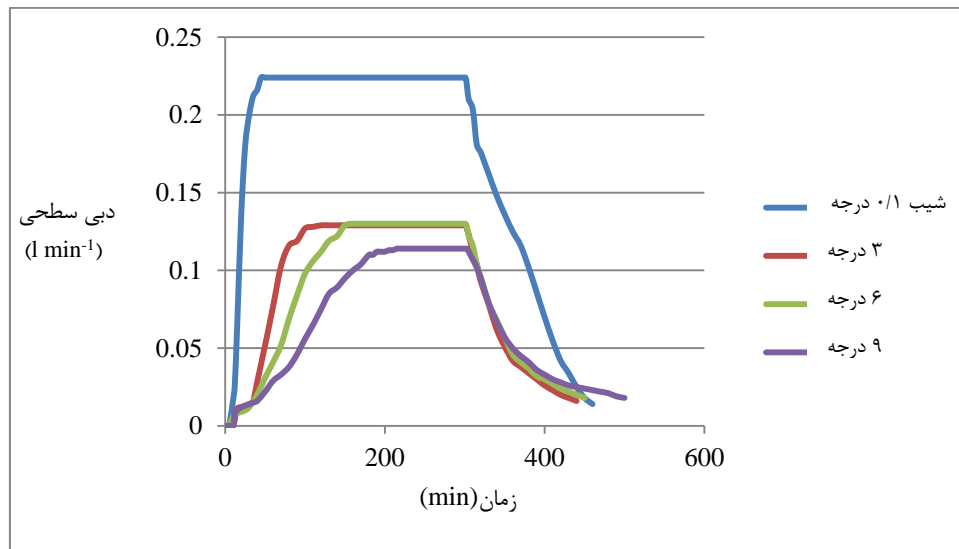
افزایش شدت بارندگی باعث تغییرات بیشینه جریان زیرسطحی نشد.

جدول ۲، خلاصه نتایج به‌دست آمده از تحقیق را نشان می‌دهد. در این جدول، مقادیر دبی بیشینه سطحی، بیشینه زیرسطحی و زمان غرقابی شدن جریان<sup>۱</sup> سطحی و زیرسطحی، زمان بیشینه سطحی و

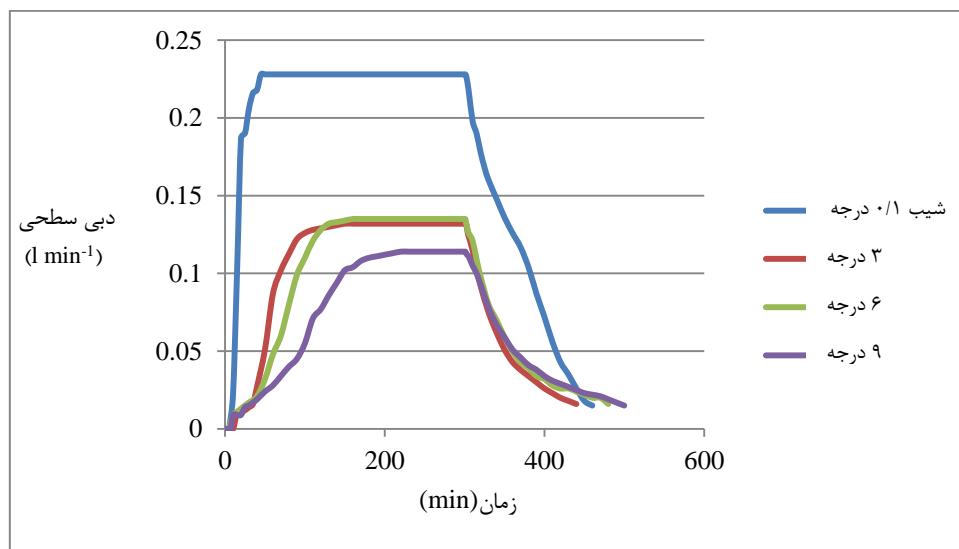
بر اساس نتایج، برای شدت بارندگی ۳۱/۷۳ میلی‌متر بر ساعت مقدار بیشینه زیرسطحی در تغییر شیب از حالت افقی به زاویه سه تا نه درجه نصف می‌شود. بیشینه زیرسطحی در سه زاویه سه، شش و نه درجه تقریباً یکسان است و تغییرات نامحسوسی ندارند. برای شدت بارندگی ۴۷/۶ و ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت نیز شرایط جریان نیز به همین صورت است.

<sup>1</sup> Time of ponding

زمان بیشینه زیرسطحی و نسبت جریان سطحی به زیرسطحی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تغییرات دبی جریان زیرسطحی تحت شیب‌های مختلف و بارش ۴۷/۶ میلی‌متر بر ساعت



شکل ۹- تغییرات دبی جریان زیرسطحی تحت شیب‌های مختلف و بارش ۶۳/۴۶ میلی‌متر بر ساعت

زمین‌های شیب‌دار جریان سطحی بیشتر و نفوذ کمتر می‌شود.

هر چه مقدار شدت بارش افزایش یابد نسبت جریان سطحی به زیرسطحی نیز افزایش می‌یابد و این مقدار ثابت نمی‌باشد. این قضیه به شدت بارش مازاد و نفوذ بستگی دارد. نفوذ مکانیسم پیچیده‌ای است که همیشه جواب‌های جریان سطحی و زیرسطحی را تحت تغییرات وسیعی قرار می‌دهد.

بر اساس نتایج، نسبت جریان سطحی به زیرسطحی وقتی صفحه به صورت شیب‌دار می‌شود، مقدار نسبت افزایش می‌یابد. به طور مثال در شدت بارش ۳۱/۷۳ مقدار این نسبت از ۳/۶۴ به ۷/۳۳ تا ۷/۹۵ افزایش یافته و دو برابر می‌شود. در شدت بارش‌های دیگر نیز این نسبت در حالت شیب‌دار صفحه دو برابر می‌شود، لذا می‌توان نتیجه گرفت که در صفحات شیب‌دار نسبت جریان سطحی نسبت به حالت افقی دو برابر است و این نشان می‌دهد که در

جدول ۲- نتایج پاسخ جریان سطحی و زیرسطحی

بارندگی (لیتر بر دقیقه)	شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)	شیب (درجه)	بیشینه زیرسطحی (لیتر بر دقیقه)	بیشینه سطحی (لیتر بر دقیقه)	زمان غرقابی سطحی (دقیقه)	زمان غرقابی زیرسطحی (دقیقه)	زمان بیشینه سطحی (دقیقه)	زمان بیشینه زیرسطحی (دقیقه)	نسبت سطحی به زیرسطحی
		۰	۰/۲۱۴	۰/۷۸	۲۰	۲۰	۵۵	۶۰	۳/۶۴
۱	۳۱/۷۳	۳	۰/۱۱۶	۰/۸۵	۳	۹۰	۱۵	۱۲۰	۷/۳۳
		۶	۰/۱۱۲	۰/۸۷	۲	۱۳۰	۱۰	۱۷۰	۷/۷۷
		۹	۰/۱۱۲	۰/۸۹	۴	۱۶۵	۱۰	۱۹۵	۷/۹۵
		۰	۰/۲۲۴	۱/۳۱	۱۰	۲۰	۴۰	۴۵	۵/۸۵
۱/۵	۴۷/۶	۳	۰/۱۲۹	۱/۳۵	۳	۷۰	۱۰	۱۲۰	۱۰/۴۷
		۶	۰/۱۳	۱/۳۷	۱	۱۱۰	۵	۱۶۰	۱۰/۵۴
		۹	۰/۱۱۴	۱/۳۹	۲	۶۰	۵	۲۱۵	۱۲/۱۹
		۰	۰/۲۲۸	۱/۷۶	۱۰	۱۵	۳۰	۴۰	۷/۷۲
		۳	۰/۱۳۲	۱/۸۵	۲	۷۰	۵	۱۵۰	۱۴/۰۲
۲	۶۳/۴۶	۶	۰/۱۳۵	۱/۸۶	۲	۱۰۰	۱۰	۱۶۰	۱۳/۷۸
		۹	۰/۱۱۴	۱/۸۹	۲	۱۵۰	۵	۲۲۰	۱۶/۵۸

گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ و رگرسیون غیرخطی مقادیر ضرایب رگرسیون و ضرایب همبستگی مطابق جدول ۳ محاسبه شد.

بر اساس نتایج، ضرایب همبستگی تابع رگرسیون غیرخطی نزدیک عدد یک بود که نتایج بسیار خوب و مناسب بودند. بر اساس روابط محاسبه شده، مقادیر پاسخ جریان سطحی و زیرسطحی برای شدت بارش ۶۴/۴۶ به صورت جدول ۴ محاسبه شد. مقدار خطای متوسط تخمین جریان سطحی ۵/۶ لیتر بر دقیقه و خطای متوسط جریان زیرسطحی ۴/۳ لیتر بر دقیقه و خطای دبی سطحی به زیرسطحی برابر ۵/۶ بود که مقادیر مناسبی هستند.

رابطه بین شیب، شدت بارندگی و پارامترهای پاسخ دامنه: ارتباط بین پارامترهای پاسخ هیدرولوژیکی دامنه مانند بیشینه جریان سطحی، بیشینه جریان زیرسطحی، نسبت جریان سطحی به زیرسطحی با پارامترهایی مانند شیب و شدت بارندگی مورد بررسی قرار گرفت. در این رابطه، معادله به کار گرفته شده به صورت بود.

$$out = c(s)^a (i)^b (L)^d \quad (1)$$

که در آن،  $s$  شیب دامنه،  $i$  شدت بارندگی و  $L$  طول دامنه است. معادله (۱) برای چهار پارامتر خروجی بیشینه جریان سطحی، بیشینه جریان زیرسطحی، نسبت جریان سطحی به زیرسطحی به کار

جدول ۳- پارامترهای رگرسیون غیرخطی

ضرایب همبستگی (R)				پارامترهای خروجی out
d	c	b	a	
-۲/۷۱۵	۰/۲۵۹	۰/۱۷	-۰/۱۵۷	بیشینه زیرسطحی
-۱/۱۸	۰/۰۳۶	۱/۱۶	۰/۰۱۷	بیشینه سطحی
۱/۳۸۶	۰/۱۸۴	۰/۹۲۶	۰/۱۶۵	نسبت بیشینه سطحی به بیشینه زیرسطحی

نتیجه‌گیری  
هیدروگراف جریان زیرسطحی تحت نفوذ دامنه به ازای شیب‌های مختلف و بارندگی‌های مختلف اندازه‌گیری شدند. مهمترین نتایج حاصله عبارتند از:

در این تحقیق، از یک مدل آزمایشگاهی باران‌ساز استفاده شد. مقادیر هیدروگراف جریان سطحی،



۱- تغییرات دبی سطحی از شیب افقی به شیب سه درجه به طور متوسط بین ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش می یابد ولی تغییرات دبی سطحی از شیب سه به شش درجه و نه درجه بسیار کم بوده است. هر چه مقدار شدت بارندگی بیشتر شود، مقدار دبی بیشینه سطحی افزایش می یابد.

جدول ۴- تخمین پارامترهای پاسخ جریان سطحی و زیرسطحی برای شدت بارندگی ۶۴/۴۶ میلی متر بر ساعت

خطا (درصد)	نسبت سطحی به زیر سطحی (مشاهداتی)	خطا (درصد)	بیشینه بارندگی زیرسطحی (محاسباتی)	بیشینه بارندگی زیرسطحی (مشاهداتی)	خطا (درصد)	بیشینه سطحی (محاسباتی)	بیشینه سطحی (مشاهداتی)	شیب	شدت بارش (میلی متر بر ساعت)
۳/۷	۷/۴۳	۴/۵	۰/۲۴	۰/۲۳	۴/۸	۱/۸۵	۱/۷۶	۰	
۷/۱	۱۳/۰۳	۵/۴	۰/۱۴	۰/۱۳	۵/۷	۱/۹۵	۱/۸۵	۳	۶۳/۴۶
۶/۱	۱۴/۶۲	۶/۵	۰/۱۳	۰/۱۳	۶/۴	۱/۹۸	۱/۸۶	۶	
۵/۷	۱۵/۶۴	۵/۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۵/۴	۱/۹۹	۱/۸۹	۹	

۳- بر اساس نتایج نسبت جریان سطحی به زیرسطحی وقتی صفحه به صورت شیب دار می شود مقدار نسبت افزایش می یابد. به طور مثال در شدت بارش ۳۱/۷۳ مقدار این نسبت از ۳/۳۶۴ به ۷/۳۳ تا ۷/۹۵ افزایش می یابد، یعنی دو برابر می شود. در شدت بارش های دیگر نیز این نسبت در حالت شیب دار صفحه دو برابر می شود، لذا می توان نتیجه گرفت که در صفحات شیب دار نسبت جریان سطحی نسبت به حالت افقی دو برابر است.

۲- برای شدت بارندگی ۳۱/۷۳ مقدار بیشینه زیرسطحی در تغییر شیب از حالت افقی به زاویه سه تا نه درجه نصف می شود. بیشینه زیرسطحی در سه زاویه سه، شش و نه درجه تقریباً یکسان است و تغییرات نامحسوسی ندارند. برای شدت بارندگی ۴۷/۶ و ۶۳/۴۶ نیز شرایط جریان نیز به همین صورت است. افزایش شدت بارندگی باعث تغییرات بیشینه جریان زیرسطحی نشد. به طور کلی تغییر شیب باعث کاهش نفوذ و جریان زیرسطحی می شود.

#### منابع مورد استفاده

1. Beven, K.J. 2012. Rainfall-runoff modelling: the primer. Wiley-Blackwell, 488 pages.
2. Dunne, T. 1978. Field studies of hillslope flow processes. Wiley, New York (Chapter 7).
3. Dunne, T. and R.D. Black. 1970. Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. Water Resources Research, 6: 1296-1311.
4. Eshleman, K.N., J.S. Pollard and A.K. O'Brien. 1993. Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations. Water Resources Research, 29(10): 3577-3587.
5. Lee, K.T. and C.H. Chang. 2005. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling. Journal of Hydrology, 311: 91-105.
6. Philip, J.R. 1991. Hillslope infiltration: planar slopes. Water Resources Research, 27(1): 109-117.
7. Fujieda, M., T. Kudoh, V. de Cicco and J.L. de Calvarcho. 1997. Hydrologic processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, San Paulo, Brazil. Journal of Hydrology, 196: 26-46.
8. Freeze, R.A. 1971. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. Water Resources Research, 7: 929-941.
9. Freeze, R.A. 1972a. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 1. Base flow contributions to channel flow. Water Resources Research, 8: 609-623.
10. Freeze, R.A. 1972b. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas. Water Resources Research, 8: 1272-1283.
11. Freeze, R.A. and R.L. Harlan. 1969. Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model. Journal of Hydrology, 9: 237-258.

12. Fiori, A., M. Romanelli, D.J. Cavalli and D. Russo. 2007. Numerical experiments of stream flow generation in steep catchments. *Journal of Hydrology*, 339: 183–192.
13. Morbidelli, R., C. Saltalippi, A. Flammini, M. Cifrodelli, C. Corradini and R.S. Govindaraju. 2015. Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling. *Journal of Hydrology*, 523: 79-85.
14. Montgomery, D.R. and W.E. Dietrich. 2002. Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape. *Water Resources Research*, 38(9): 1168-1186.
15. Sabzevari, T., M.H. Fattahi, R. Mohammadpour and S. Noroozpour. 2013. Prediction of surface and subsurface flow in catchments using the GIUH. *Journal of Flood Risk Management*, 6: 135–145.
16. Sabzevari, T. and S. Noroozpour. 2014. Effects of hillslope geometry on surface and subsurface flows. *Journal of Hydrology*, 22(7): 1593-1604.
17. Sharpley, A.N. and J.R. Williams. 1990. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model determination. US Department of Agriculture. Tech. Bull., No. 1768.

## Investigation of surface and subsurface runoff of catchment's hillslopes with loamy sand soil, case study: Estahban Watershed

Touraj Sabzevari<sup>\*1</sup>, Mehdi Mokhberi<sup>2</sup> and Sadegh Hosseini khotbehsara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran <sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran and <sup>3</sup> MSc Student, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

Received: 01 March 2017

Accepted: 10 October 2017

### Abstract

Catchments consist of a series of sloping pervious overland whose surface and subsurface runoffs are transmitted to their outlet through stream networks. In the catchments with high perviousness and good vegetation cover, the amount of subsurface gains more significance and it might have a considerable share in the direct runoff. In this study, a hydrologic rainfall simulator model with the length of 1.92 meter and width of one meter and depth of 0.35 meter has been used which its surface and subsurface amount of flow have been measured by means of two different weirs. The texture of soil in Estahban Watershed was loamy sand. The experiments were conducted under three slope angles of 0.1, 3, 6 and 9 degrees and under rainfall intensity of 31.73, 47.6 and 63.46 millimeter per hours. Based on the results, the slope changes from 0.1 to 3 degrees resulted in 50 percent decrease in the subsurface flow and 10 to 15 percent increase in the surface flow in different rainfalls, but, from the slope of 3 to 9 degrees, no significant change was observed in the two flows and in the slope change from 6 to 9 percent of subsurface flow and 2 percent of surface flow, there was surface flow observed. The increase in rainfall intensity causes rise in hydrograph amount of surface and subsurface flow. The proportion of surface to subsurface flow changed on average between 7.5 and 14.5 times the subsurface flow under three rainfalls for the loamy sand. With the increase in slope, the surface flow amount increases and infiltration decreases. In this study, two non-linear regression equations were presented for measuring surface and subsurface peaks which is a function of length, slope and rainfall intensity of the slope.

**Key words:** Catchment, Linear regression equation, Loamy sand soil, Stream network, Subsurface flow, Surface flow

---

\* Corresponding author: tooraj.sabzevari@gmail.com