

کارایی معادلات نفوذ و بررسی نفوذپذیری سطحی در عرصه‌های پخش سیلاب استان یزد

محمد رضا فاضل پور عقدائی^{۱*}، حسین ملکی نژاد^۲، محمد رضا اختصاصی^۳ و جلال برخوردار^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ^۲ استاد، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد و ^۴ مربی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۳۰

چکیده

از اهداف اصلی اجرای پروژه‌های پخش سیلاب، نفوذ آب به داخل خاک و تغذیه آبخوان‌ها است. بدین منظور، تغییرات نفوذپذیری خاک سطحی در عرصه‌های پخش سیلاب در استان یزد شامل پخش سیلاب سی‌ریزی بافق، هرات و میانکوه مهریز به‌عنوان نماینده مناطق خشک و نیمه‌خشک بررسی شد. در این پژوهش، در هر عرصه پخش سیلاب ۱۲ آزمایش نفوذپذیری (نوارهای اول تا چهارم و در هر نوار سه آزمایش) به روش استوانه‌های مضاعف انجام شد. با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نفوذ، کارایی مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوپیس، هورتن، SCS و فیلپ در برآورد نفوذ تجمعی در عرصه‌های پخش سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، میانگین نفوذپذیری برای عرصه‌های پخش سیلاب سی‌ریزی بافق، هرات و میانکوه مهریز به ترتیب ۱/۰۶، ۱/۵۲ و ۲/۹۴ سانتی‌متر در ساعت است. همچنین، معادله مناسب برآورد نفوذ تجمعی برای عرصه پخش سیلاب بافق، معادله هورتن با RMSE برابر ۰/۰۹۷ و ضریب ناش و ساتکلیف برابر ۰/۹۹۲ بوده و برای عرصه‌های پخش سیلاب مهریز و هرات معادله کوستیاکوف-لوپیس با ضرایب RMSE و ناش و ساتکلیف به ترتیب برابر ۰/۳۵۸، ۰/۹۹۴ و ۰/۰۸۱، ۰/۹۹۱ از کارایی بیشتری در برآورد نفوذ تجمعی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آبخوان، استوانه‌های مضاعف، سرعت نفوذ، نفوذ تجمعی

مقدمه

و ایجاد محیط‌های سبز، اصلاح خاک، احیای مراتع، تولید علوفه و تغذیه مصنوعی منابع آب زیرزمینی (آبخوان‌ها) است (Hudson, ۱۹۸۷). سرعت وارد شدن آب به داخل خاک یا به عبارت دیگر سرعت نفوذ از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های آبیاری، مطالعات هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و حفاظت خاک، طراحی و اجرای پروژه‌های زهکشی و کنترل فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز است.

مهار سیلاب، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و کوشش در بهینه‌سازی بهره‌وری از منابع طبیعی از مهمترین اقداماتی است که در پخش سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک صورت می‌گیرد (Kosar, ۱۹۹۵). پخش سیلاب عبارت از استحصال، پخش رواناب سطحی و متمرکز کردن سیلاب در عرصه‌های مشخص برای مقاصد چند منظوره شامل زراعت سیلابی، تولید چوب

خاک اقدام کردند. در این رابطه، میزان نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف اندازه‌گیری شد. ضرایب پنج معادله نفوذ کوستیاکوف، گرین امپ، هورتن، SCS و فیلیپ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل کوستیاکوف مناسب‌ترین مدل برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در کلیه شرایط است. اما برای برآورد نفوذ تجمعی در دراز مدت مدل‌های فیلیپ و SCS مناسب‌تر است.

کارایی مدل‌های نفوذ در خاک‌های ورتی‌سول و غیر ورتی‌سول را با دو کاربری مرتع و کشت گندم در شرایط رطوبت اولیه زیاد و کم توسط Moradibaseri و همکاران (۲۰۱۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها از روش تک استوانه‌ای استفاده کرده و پارامترهای هر مدل را به روش بهینه حداقل مربعات تعیین نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های کوستیاکوف-لوئیس و کوستیاکوف، مدل‌های بیش برآوردگر و مدل‌های هورتن و فیلیپ کم برآوردگر بودند. در شرایط رطوبت اولیه زیاد، مدل هورتن در هر دو کاربری بهترین عملکرد را دارد، ولی در شرایط رطوبت اولیه کم، مدل کوستیاکوف-لوئیس بیشترین کارایی را در خاک‌های غیر ورتی‌سول داشته است.

روند تغییرات نفوذپذیری در ایستگاه‌های پخش سیلاب ایران در پژوهشی توسط Mahdian و همکاران (۲۰۱۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور ۱۳ ایستگاه پخش سیلاب کشور انتخاب شد و تغییرات نفوذ در پنج سال مورد پایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات نفوذ در سال اول اختلاف معنی‌داری ندارد، ولی در سال‌های بعدی از روند کاهشی برخوردار است.

Zaremejrjardi و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی در ایستگاه پخش سیلاب سرچاهان استان هرمزگان، اقدام به شبکه‌بندی سه نوار اولیه عرصه نموده، به نحوی که هر نوار به سه مستطیل تقسیم و در محل تلاقی قطرهای مستطیل و در محل‌های تلاقی نیمسازهای مثلث‌های حاصل از قطر مستطیل‌ها نقاطی به منظور اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری انتخاب شدند. طی سال‌های ۸۳ و ۸۴ در دو مرحله، شدت نفوذپذیری اندازه‌گیری شد. بررسی نتایج مقایسه نفوذپذیری نوارهای پخش سیلاب در سال اول و دوم

سرعت نفوذ به عواملی نظیر خصوصیات فیزیکی خاک، مقدار اولیه آب در خاک، شدت بارندگی یا مقدار آب آبیاری، شیب و زبری زمین، درصد و نوع پوشش گیاهی و کیفیت آب بستگی دارد (Neshat و Parekar, ۲۰۰۷). بررسی نفوذپذیری عرصه‌های پخش سیلاب برای ارزیابی کارایی این سیستم‌ها در تامین هدف اصلی خود که تغذیه آبخوان‌ها است، از مسائل ضروری در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. چرا که با توجه به کم آبی و اهمیت آب در این مناطق، کاهش نفوذپذیری عرصه‌های پخش سیلاب ناشی از ورود رسوب معلق و ته‌نشست آن، سبب ماندگاری سیلاب ورودی به آن‌ها در سطح و افزایش هدررفت ناشی از تبخیر می‌شود.

Vaghefi و Movahedzadeh (۲۰۱۴) در پژوهشی به بررسی و مقایسه مدل‌های مختلف نفوذپذیری در حوزه آبخیز دشتی با استفاده از نتایج آزمایش‌های استوانه‌های مضاعف پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمایش نفوذ، هشت معادله نفوذ را مقایسه و ضرائب معادلات را به دست آوردند. نتایج نشان داد که مدل‌های فیلیپ، کوستیاکوف و SCS نسبت به مدل‌های کوستیاکوف-لوئیس، گرین امپ، اورتن، هورتن و هال برای حوضه مورد مطالعه تناسب بیشتری داشته است. Coleman (۲۰۰۸) در پژوهشی ضرایب مدل‌های نفوذ را با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش نفوذ به روش استوانه‌های مضاعف برآورد و مورد مقایسه قرار داد. نتایج بیانگر آن است که مدل‌های گرین امپ و فیلیپ با داده‌های واقعی تطابق خوبی نداشته و مدل کوستیاکوف بهترین تطابق را با شرایط واقعی از خود نشان می‌دهد.

در پژوهشی دیگر، پارامترهای معادلات نفوذ با استفاده از خصوصیات خاک توسط Mohammadi و Refahi (۲۰۰۵) بررسی شد. میانگین قطر هندسی و ضریب پراکندگی برای خاک‌های مختلف محاسبه شده و پارامترهای سه معادله کوستیاکوف، فیلیپ و هورتن را تخمین زده شد. نتایج نشان داد که معادله کوستیاکوف تخمین زده شده با داده‌های واقعی رابطه نزدیک‌تری نسبت به معادله فیلیپ دارد.

Neshat و Parekar (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای به مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در

تجمعی بوده‌اند. همچنین، در خصوص عرصه‌های پخش سیلاب، پژوهش‌های صورت گرفته نشان دهنده روند کاهش نفوذپذیری با سیل‌گیری عرصه و ورود رسوبات ریزدانه در سال‌های متمادی بوده است. ولی در خصوص کارایی معادلات نفوذ در عرصه‌های پخش سیلاب پژوهش کمی صورت گرفته است. در استان یزد با توجه به این که پروژه‌های متعددی اجرا شده و تاکنون بررسی جامعی در خصوص وضعیت نفوذپذیری سطحی خاک و ارزیابی معادلات نفوذ در عرصه‌ها به منظور معرفی معادله‌ای که کارایی مناسبی در برآورد نفوذ تجمعی داشته باشد، انجام نشده، در این پژوهش میزان نفوذپذیری سطحی خاک و کارایی معادلات نفوذ در عرصه‌های پخش سیلاب استان یزد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد پژوهش: حوضه سی‌ریزی بافق در مختصات $33^{\circ} 55'$ تا $33^{\circ} 56'$ طول شرقی و $21^{\circ} 02'$ تا $33^{\circ} 31'$ عرض شمالی با وسعت ۱۴۱ هزار هکتار در جنوب شرقی شهرستان بافق قرار دارد. حداکثر ارتفاع حوضه ۲۷۹۵ متر در جنوب غربی و حداقل آن ۱۰۶۹ در قسمت شرقی با ارتفاع متوسط ۱۵۲۰ متر از سطح دریا است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه برابر ۱۱۰ میلی‌متر است. محل اجرای پروژه پخش سیلاب بر روی آبخوان اصلی دشت بافق با ضخامت آبرفت بیش از ۱۰۰ متر و مجاور رودخانه سی‌ریزی و به فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بافق و با وسعت ۳۱۶ هکتار با دو سایت اجرایی قرار دارد.

حوزه آبخیز میانکوه یکی از زیرحوضه‌های دشت یزد اردکان است. این حوضه در مختصات جغرافیایی $31^{\circ} 03'$ تا $54^{\circ} 25'$ طول شرقی و $26^{\circ} 31'$ تا $43^{\circ} 31'$ عرض شمالی در جنوب غربی استان یزد و شمال غرب شهرستان مهریز واقع شده است. این حوضه دارای مساحت ۶۳۳۰۰ هکتار است. کمینه ارتفاع این حوضه ۱۵۳۰ متر و بیشینه آن ۴۰۴۴ متر از سطح دریا است. متوسط بارش سالانه آن ۲۰۵ میلی‌متر و بیشینه آن در ارتفاعات شیرکوه ۳۹۷ میلی‌متر است. پخش سیلاب اجرا شده در خروجی حوضه میانکوه و

نشان داد که میزان نفوذپذیری نوارهای پخش در سال دوم نسبت به سال اول کمتر شده و این کاهش از لحاظ آماری برای نوارهای اول و دوم در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. البته مهمترین علت کاهش نفوذپذیری تجمع رسوبات در سطح خاک است.

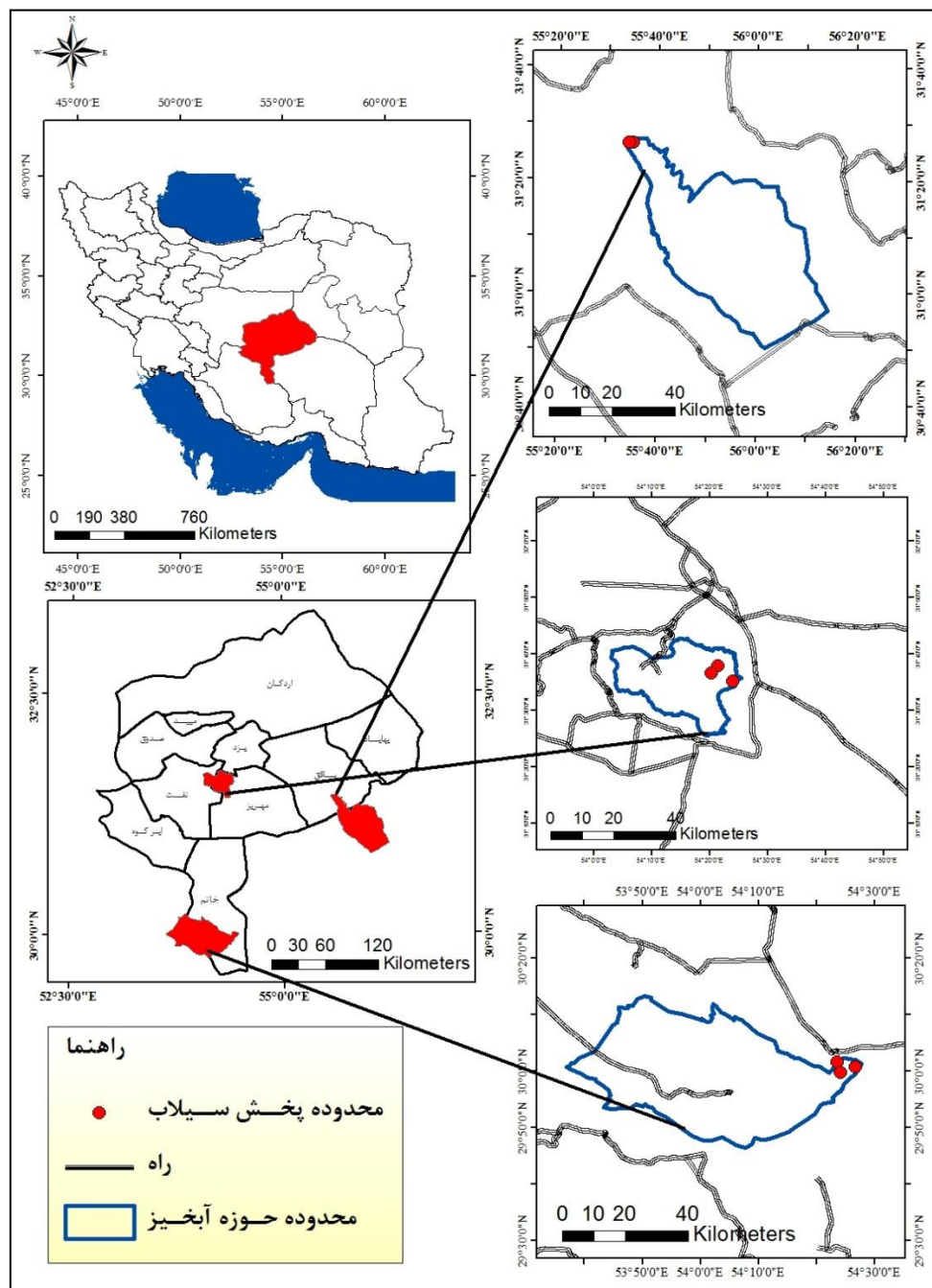
در پژوهشی دیگر، Yukuan و همکاران (۲۰۰۷) سه مدل هورتون، کوستیاکوف و کوستیاکوف اصلاح شده را برای شیب‌هایی با خاک‌هایی با رنگ ارغوانی مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، با استفاده از باران‌ساز، مقادیر نفوذ اندازه‌گیری شده و تعداد ۲۴ داده جمع‌آوری شد. داده‌های مشاهداتی با نتایج حاصل از مدل‌های مورد بررسی با استفاده از معیارکفایت ناش و ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل هورتون با معیار کفایت ناش و ساتکلیف ۶۹/۷ درصد بهترین کارایی را برای منطقه مورد مطالعه داشته است. Parchamiaraghi و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی معادلات نفوذ گرین-امپ، فیلیپ، کوستیاکوف-لوئیس، SCS و هورتون را مورد مقایسه قرار داده و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل کوستیاکوف-لوئیس در تمامی شرایط مدل مناسب‌تری برای برآورد نفوذ تجمعی است.

Kavusi و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی برخی معادلات نفوذ آب در خاک در کاربری‌های مختلف در حوزه آبخیز کجور پرداختند. آن‌ها با استفاده از استوانه‌های مضاعف در چهار کاربری جنگل، باغ، کشاورزی و اراضی ساحلی اقدام به اندازه‌گیری نفوذ کرده و مدل‌های مختلف نفوذ را با استفاده از شاخص‌های R^2 ، ضریب ناش و ساتکلیف، RMSE و ME مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل کاستیاکوف در هر چهار کاربری بهترین برآورد را با داده‌های تجربی دارد.

با نگاهی به پژوهش‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که در اکثر پژوهش‌ها، معادله کوستیاکوف به‌عنوان مدل مناسب برآورد نفوذ تجمعی آب در خاک معرفی شده است. البته کارایی این مدل در کاربری‌هایی نظیر مرتع و اراضی کشاورزی بررسی شده است. سایر معادلات نفوذ نیز دارای کارایی نسبتاً پایین‌تری نسبت به معادله کوستیاکوف در برآورد نفوذ

پخش سیلاب اجرا شده در انتهای خروجی حوضه هرات و به وسعت ۴۰۴ هکتار و مشتمل بر پنج سایت اجرایی است. موقعیت حوضه‌ها و پخش سیلاب‌های اجرا شده در شکل ۱ آمده است. همچنین، دبی بیشینه لحظه‌ای سیلاب ورودی به عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. ضمناً آمار دقیقی از میزان رسوب ورودی به عرصه‌های پخش سیلاب به‌دست نیامد.

با وسعت ۲۷۰ هکتار با سه سایت اجرایی شامل سایت‌های فخرآباد، قنات زنبیل و تنگ لایید است. حوضه آبخیز هرات به وسعت ۱۴۱۳ کیلومتر مربع با مختصات $54^{\circ} 21'$ تا $58^{\circ} 38'$ طول شرقی و 30° تا $29^{\circ} 47'$ عرض شمالی در جنوب استان یزد و جنوب غرب شهرستان خاتم واقع شده است. بیشینه ارتفاع حوضه هرات ۳۲۶۵ متر و کمینه ۱۷۳۰ متر با متوسط ۲۲۰۷ متر از سطح دریا است. متوسط بارش سالانه حوضه ۲۱۷ میلی‌متر در سال است. موقعیت



شکل ۱- محدوده‌های مورد مطالعه بافق، مهریز و هرات

جدول ۱- مشخصات سیلاب‌های ورودی به عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه

میانکوه مهریز		سی‌ریزی بافق		هرات	
دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)	سال وقوع سیلاب	دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)	سال وقوع سیلاب	دبی حداکثر لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)	سال وقوع سیلاب
۴	۱۳۷۶	۴	۱۳۷۶	۲/۴۶	۱۳۸۱
۴	۱۳۷۷	۵	۱۳۷۷	۲/۱	۱۳۸۱
۴	۱۳۷۸	۵	۱۳۷۷	۱۳/۹	۱۳۸۲
۳	۱۳۸۰	۴	۱۳۷۸	۷/۳	۱۳۸۲
۳/۵	۱۳۸۱	۲	۱۳۷۸	۲/۹	۱۳۸۲
۴	۱۳۸۷	۱	۱۳۸۰	۱/۵	۱۳۸۲
۵/۵	۱۳۹۰	۳	۱۳۸۲	۶/۹	۱۳۸۳
۴	۱۳۹۲	۲	۱۳۸۳	۳/۰۷	۱۳۸۳
-	-	۵	۱۳۸۳	۳/۶۶	۱۳۸۳
-	-	-	-	۱/۹۲	۱۳۸۵
-	-	-	-	۱/۸	۱۳۸۶
-	-	-	-	۰/۹۷	۱۳۸۸
-	-	-	-	۰/۸۶	۱۳۸۹

روش پژوهش: برای انجام این پژوهش و به منظور یافتن میانگین مناسبی از نفوذپذیری هر عرصه پخش سیلاب در چهار نوار اول (بیشترین آبیگری را داشته و شاخصی از کل عرصه می‌باشند) و در هر نوار سه آزمایش نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف (شکل ۲) انجام شد. محل نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که علاوه بر این که در معرض سیل قرار داشته، معرف وضعیت میانگین عرصه محدوده خود باشد. این نقاط خارج از کانال پخش و بر روی عرصه پخش به فاصله ۱۵ متر از پشته پایین دست انتخاب شد. تعداد ۱۲ آزمایش در عرصه‌های پخش سیلاب (نوارهای اول تا چهارم) به صورت تصادفی و بازه‌های زمانی اندازه‌گیری نفوذ یک دقیقه، دو، پنج، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه است. داده‌های نفوذ به نرم‌افزارهای

Excel و Spss وارد شده و میانگین نفوذپذیری در عرصه‌های پخش سیلاب محاسبه شد. سپس، منحنی برازش معادلات ریاضی بر داده‌ها صورت گرفت و بهترین رابطه استخراج شد. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرائی معادله نفوذ تجمعی و همچنین، سرعت نفوذ آب به خاک برای عرصه‌های پخش سیلاب استخراج شد. با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نفوذ کارایی مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییس، هورتون، SCS و فیلیپ در برآورد نفوذ تجمعی در عرصه‌های پخش سیلاب بررسی شد. در جدول ۲ مدل‌های نفوذ مورد بررسی و پارامترهای برازش آن‌ها آمده است.



شکل ۲- اندازه‌گیری نفوذپذیری به روش استوانه مضاعف در منطقه

جدول ۲- مدل‌های نفوذ مورد بررسی و پارامترهای آنها

نام مدل	پارامترها	معادله
فلیپ	I نفوذ تجمعی (لیتر)، t زمان، S ضریب جذبی خاک (تابع مکش خاک) و K_S ضریبی که بیانگر هدایت آبی اشباع خاک است.	$I = St^{1/2} + k_s t$
کوستیاکف	I نفوذ تجمعی (لیتر)، t زمان و k, b و A ضرایبی تجربی هستند.	$I = kt^b$
کوستیاکف-لوییس	I نفوذ تجمعی (لیتر)، t زمان و k, b و A ضرایبی تجربی هستند.	$I = kt^b + A$
هورتون	I نفوذ تجمعی (لیتر) و a, C, m ضرایبی تجربی هستند.	$I = Ct + m(1 - e^{-at})$
SCS	I نفوذ تجمعی (لیتر)، ضرایب a, b و m تابعی از شماره منحنی‌های نفوذی است که با آزمایش‌های فراوان برای خاک‌های آمریکا به دست آمده است.	$I = at^b + 0.6985$

مجذور میانگین مربعات خطا^۲: این شاخص آماری با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{ei})^2}{n}} \quad (2)$$

که در آن، $RMSE$ مجذور میانگین مربعات خطا، X_{oi} مقدار مشاهده شده پارامتر، X_{ei} مقدار محاسبه شده پارامتر و n تعداد برآورد است. در نهایت، بهترین شبیه‌سازی متعلق به روشی است که مقدار کوچک‌تری از $RMSE$ را ارائه کند (Karimi و همکاران، ۲۰۱۱).

نتایج و بحث

منحنی نفوذپذیری (سرعت نفوذ) و نفوذ تجمعی برای هر منطقه که با استفاده از آزمایش استوانه‌های مضاعف در عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است. معادله ریاضی مناسب برازش داده شده بر داده‌های آزمایش در کنار هر منحنی آمده است.

با برازش معادله‌های مختلف نفوذ تجمعی بر داده‌های مشاهداتی ضرایب هر معادله به شرح جدول ۴ نتیجه شد. همچنین، شاخص‌های ارزیابی معادله‌های در جدول ۳ آمده است. معادلات مختلف با توجه به ضرایب محاسبه شده به تفکیک هر عرصه پخش سیلاب در جدول ۵ ارائه شده است.

به منظور ارزیابی کارایی معادلات نفوذ از ضرایب ناش و ساتکلیف (NS) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به شرح زیر استفاده شد.

ضریب ناش و ساتکلیف^۱: ناش و ساتکلیف (۱۹۷۰)

معیاری برای برازش خوب، به صورت رابطه زیر که معروف به ضریب ناش و ساتکلیف است، ارائه کردند.

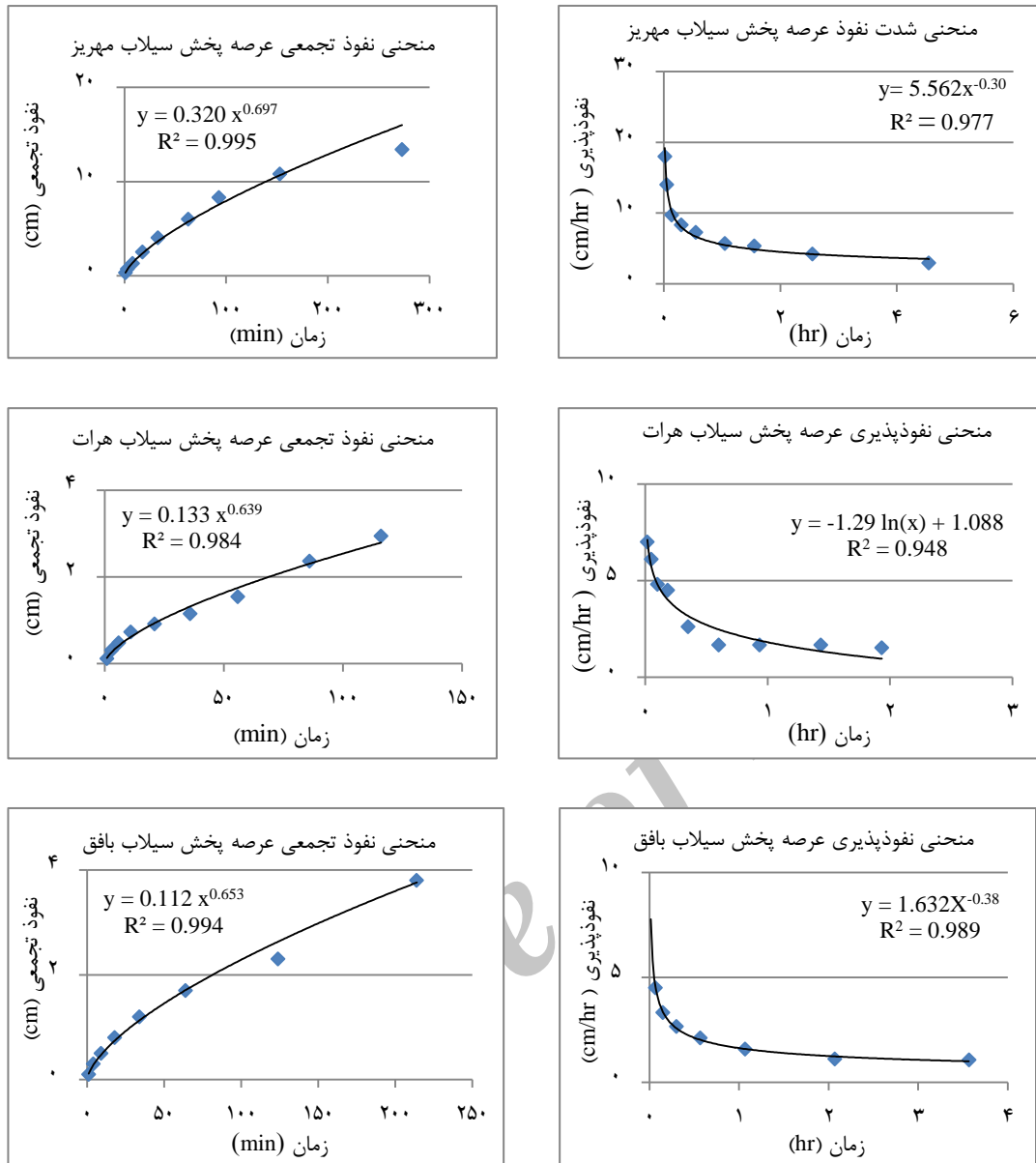
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ei})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (1)$$

که در آن، NS ضریب ناش ساتکلیف، Q_{oi} مقدار مشاهده شده دبی سیل، Q_{ei} مقدار برآورد شده دبی سیل و \bar{Q}_{oi} میانگین داده‌های مشاهده شده دبی سیل و n شماره‌ای از مقادیر دبی است.

در این روش، دامنه خطا در محدوده $[-\infty, 1]$ است. اگر $0 \leq NS \leq 1$ باشد، مقدار خطا از واریانس داده‌ها بیشتر نمی‌شود. در صورتی که واریانس خطاها تا اندازه واریانس مشاهدات بزرگ‌تر شود، مقدار $NS=0$ خواهد شد و اگر واریانس خطاها از واریانس مشاهده شده فراتر رود، مقدار $NS < 0$ خواهد شد. اگر مقدار NS از منفی بی‌نهایت به سمت صفر میل کند، داده‌ها خوب برآورد شده و هر چه مقدار این معیار به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده کارایی بیشتر مدل است. به علاوه در یک مدل عالی مقدار $NS=1$ خواهد شد (Shirzadi و همکاران، ۲۰۱۱).

² Root Mean Square Error

¹ Nash and Sutcliffe



شکل ۳- منحنی‌های نفوذپذیری و نفوذ تجمعی عرصه‌های پخش سیلاب

پخش سیلاب شده و هدر رفت ناشی از تبخیر افزایش می‌یابد. همچنین، Mahdian و همکاران (۲۰۱۱) و Zaremehrijardi و همکاران (۲۰۱۳) نیز روند کاهش نفوذپذیری عرصه‌های پخش سیلاب را تایید نموده و متاثر از ورود رسوبات ریزدانه همراه سیل دانسته‌اند. نفوذپذیری عرصه‌های پخش سیلاب به‌عنوان شاخص اصلی در خصوص تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی است. همچنین، اجرای این‌گونه سیستم‌ها در مناطق خشک با هزینه زیادی همراه است، آبگیری‌های متعدد و ته‌نشست رسوب ریزدانه از نفوذپذیری سطحی به

نتایج نشان داد که نفوذپذیری سطحی در عرصه پخش سیلاب سی‌ریزی بافق، میانکوه مهریز و هرات به ترتیب ۱/۰۶، ۲/۹۴ و ۱/۵۲ سانتی‌متر در ساعت است. با توجه به طبقه‌بندی نفوذپذیری سطحی خاک (جدول ۶) نفوذپذیری عرصه پخش سیلاب مهریز در طبقه متوسط و بافق و هرات در طبقه کمی آهسته قرار دارند. این موضوع با توجه به این که هدف اصلی اجرای پروژه‌های پخش سیلاب در استان یزد تغذیه آبخوان است، نگران کننده بوده و توجه به بالا بودن میزان تبخیر استان سبب کاهش کارایی سیستم‌های

میزان قابل توجهی کاسته، به طوری که نفوذپذیری کارایی پروژه‌ها را به میزان زیادی کاهش می‌دهد. سطحی خاک در طبقه متوسط تا کم واقع شده و

جدول ۳- ضرایب معادلات برآوردی نفوذ در عرصه‌های پخش سیلاب

معادله نفوذ	ضرائب	پخش سیلاب بافق	پخش سیلاب مهریز	پخش سیلاب هرات
فیلیپ	MSE	۰/۰۱۳۳	۰/۳۳۳	۰/۰۰۹
	RMSE	۰/۱۱۶	۰/۵۷۷	۰/۰۹۳
	NS	۰/۹۹۰	۰/۹۸۳	۰/۹۸۹
کوستیاکوف	MSE	۰/۰۱۳۴	۰/۲۴۵	۰/۰۱۲
	RMSE	۰/۱۱۵	۰/۴۹۴	۰/۱۰۸
	NS	۰/۹۹۰	۰/۹۸۸	۰/۹۸۶
کوستیاکوف-لوئیس	MSE	۰/۴۸۹	۰/۱۲۸	۱/۰۰۷
	RMSE	۰/۶۹۹	۰/۳۵۸	۰/۰۸۱
	NS	۰/۶۳۵	۰/۹۹۴	۰/۹۹۱
هورتن	MSE	۰/۰۰۹	۱/۳۸۸	۰/۰۴۲
	RMSE	۰/۰۹۷	۱/۱۷۸	۰/۲۰۶
	NS	۰/۹۹۲	۰/۹۲۹	۰/۹۴۷
SCS	MSE	۰/۰۹۰	۰/۴۵۳	۰/۰۶۸
	RMSE	۰/۳۰۱	۰/۶۷۳	۰/۲۶۱
	NS	۰/۹۳۳	۰/۹۷۷	۰/۹۱۶

جدول ۴- ضرایب معادلات نفوذ در عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه

معادله نفوذ	ضرائب	پخش سیلاب بافق	پخش سیلاب مهریز	پخش سیلاب هرات
فیلیپ	S	۰/۱۴۴	۰/۶۸۱	۰/۱۳۴
	KS	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۰/۰۱۲
	R2	۰/۹۹۱	۰/۹۸۳	۰/۹۹۰
کوستیاکوف	K	۰/۱۱۲	۰/۵۴۶	۰/۱۱۱
	b	۰/۶۵۱	۰/۵۷۹	۰/۶۸۳
	R2	۰/۹۸۹	۰/۹۸۸	۰/۹۸۶
کوستیاکوف-لوئیس	K	۰/۱۴۵	۲/۱۸۳	۰/۱۹۱
	b	۰/۴۹۶	۰/۹۸۳	۰/۳۰۱
	A	۰/۰۰۸	-۱/۹۳۲	۰/۰۱۸
هورتن	R2	۰/۹۹۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۲
	c	۰/۰۱۳	۰/۰۴۶	۰/۰۱۷
	m	۰/۸۲۵	۲/۲۸۹	۱/۲۴۸
SCS	a	۰/۰۹۳	۰/۵۹۱	۰/۰۱۲
	R2	۰/۹۹۳	۰/۹۴۰	۰/۹۸۸
	a	۰/۰۰۷	۰/۳۵۴	۰/۰۰۳
SCS	b	۱/۱۲۹	۰/۶۴۹	۱/۴۰۴
	R2	۰/۹۲۴	۰/۹۷۷	۰/۹۱۶

جدول ۵- معادله‌های حاصل شده برای مناطق مورد مطالعه

معادله	پخش سیلاب بافق	پخش سیلاب مهریز	پخش سیلاب هرات
فیلیپ	$I=0.144t^{0.5}+0.007t$	$I=0.681t^{0.5}+0.01t$	$I=0.134t^{0.5}+0.012t$
کوستیاکوف	$I=0.112t^{0.651}$	$I=0.546t^{0.579}$	$I=0.111t^{0.683}$
کوستیاکوف-لویی	$I=0.145t^{0.496}+0.008$	$I=2.183t^{0.983}-1.932$	$I=0.191t^{0.301}+0.018$
هورتن	$I=0.013t + 0.825 (1-e^{-0.093t})$	$I=0.046t + 2.289 (1-e^{-0.591t})$	$I=0.017t + 1.248 (1-e^{-0.012t})$
SCS	$I=0.007t^{1.129}+0.6985$	$I=0.354t^{0.649}+0.6985$	$I=0.003t^{1.404}+0.6985$

۰/۹۸۹ و RMSE برابر ۰/۰۹۳ در رتبه دوم است. معادلات کاستیاکوف، هورتن و SCS با ضرایب ناش و ساتکلیف و RMSE به ترتیب ۰/۹۸۶، ۰/۱۰۸، ۰/۹۴۷ و ۰/۲۰۶، ۰/۹۱۶ و ۰/۲۶۱ در رتبه سوم تا پنجم قرار گرفتند.

جدول ۶- طبقه‌بندی نفوذپذیری سطحی خاک (Rajaiie و همکاران، ۲۰۱۳)

طبقه‌بندی نفوذ	سرعت نفوذ (cmhr ⁻¹)
خیلی سریع	۲۵/۴ <
سریع	۲۵/۴-۱۲/۷
کمی سریع	۱۲/۷-۶/۳۳
متوسط	۶/۳۳-۲
کمی آهسته	۲-۰/۵
آهسته	۰/۵-۰/۱۲۷
خیلی آهسته	۰/۱۲۷ >

در نهایت، معادلات مناسب در عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه که برازش خوبی با داده‌های مشاهداتی داشتند، در جدول ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده معادلات نفوذ هورتن و کاستیاکوف-لویی در عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه در استان یزد بیشترین کارایی را در برآورد میزان نفوذ تجمعی داشته‌اند. این موضوع با پژوهش نتایج پژوهشگرانی نظیر Coleman (۲۰۰۸)، Neshat و Parekar (۲۰۰۷) و Kavusi و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت ندارد. آن‌ها بهترین مدل برآورد نفوذ تجمعی را معادله کاستیاکوف نتیجه‌گیری نمودند. این

بررسی معادلات نفوذ در عرصه‌های پخش سیلاب نشان داد که در عرصه‌های پخش سیلاب بافق معادله هورتن با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۹۹۲ و RMSE برابر ۰/۰۹۷ بهترین برازش را با داده‌های مشاهداتی دارد. این نتیجه با نتایج پژوهش Moradibaseri و همکاران (۲۰۱۱) و Yukuan و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد. معادله کاستیاکوف با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۹۹۰ و RMSE برابر ۰/۱۱۵، معادله فیلیپ با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۹۹۰ و RMSE برابر ۰/۱۱۶ و معادله SCS با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۹۳۳ و RMSE برابر ۰/۳۰۱ در رتبه‌های بعدی قرار داشته و معادله کاستیاکوف-لویی با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۶۳۵ و RMSE برابر ۰/۶۹۹ نسبت به معادلات دیگر در رتبه آخر واقع و برازش خوبی با داده‌های مشاهداتی ندارد. در عرصه پخش سیلاب مهریز معادله کاستیاکوف-لویی با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۹۹۴ و RMSE برابر ۰/۳۵۸ بهترین معادله شناخته شد. معادله‌های کاستیاکوف، فیلیپ، SCS و هورتن با ضرایب ناش و ساتکلیف و RMSE به ترتیب ۰/۹۸۸، ۰/۴۹۴، ۰/۹۸۳ و ۰/۵۷۷، ۰/۹۷۷ و ۰/۶۷۳، ۰/۹۲۹ و ۱/۱۷۸ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، در عرصه پخش سیلاب هرات معادله کاستیاکوف-لویی با ضریب ناش و ساتکلیف ۰/۹۹۱ و RMSE برابر ۰/۰۸۱ در رتبه اول قرار دارد که با نتیجه پژوهش Parchamiaraghi و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد. معادله فیلیپ با ضریب ناش و ساتکلیف

حاضر عرصه‌های پخش سیلاب بررسی شد که تحت تاثیر سیلاب ورودی به آن میزان نفوذ سطحی تغییر کرده و کارایی معادلات نفوذ را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

موضوع می‌تواند به تفاوت در کاربری‌های مورد بررسی برگردد. به طوری که در پژوهش‌های یادشده میزان نفوذ تجمعی در عرصه‌های طبیعی نظیر جنگل، مرتع و اراضی کشاورزی انجام گرفته است. ولی در پژوهش

جدول ۷- بهترین معادلات نفوذ عرصه‌های پخش سیلاب مورد مطالعه

معادله	مدل	نام آبخوان
$I=0.013 t + 0.825 (1-e^{-0.093t})$	هورتن	بافق
$I=2.183 t^{0.983} - 1.932t$	کوستیاکوف-لوئیس	مهریز
$I=0.191 t^{0.301} + 0.018t$	کوستیاکوف-لوئیس	هرات

تغذیه به آبخوان و همچنین، تعیین هدررفت ناشی از تبخیر در سیستم‌های پخش سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، نکته حائز اهمیت این است که بررسی میزان نفوذپذیری عرصه‌های پخش سیلاب به عنوان شاخصی از تغذیه آبخوان جزو موارد مهم و ضروری بوده که نیاز به پژوهش‌های بیشتری در این خصوص دارد و مهمتر از آن ارائه راه کارهای اجرایی جهت رفع این مشکل و حفظ کارایی عرصه‌های پخش سیلاب از اولویت‌های پژوهشی در این زمینه است. لذا، پیشنهاد می‌شود با توجه به نتیجه این پژوهش و نتایج پژوهشگران دیگر که به کاهش نفوذپذیری عرصه پخش سیلاب در اثر ورود رسوبات ریزدانه اشاره نموده اند، در طراحی سیستم‌های پخش سیلاب باید به موضوع احداث استخرهای رسوبگیر قبل از سامانه پخش سیلاب توجه بیشتری معطوف شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی معادلات مختلف نفوذ در برآورد نفوذ تجمعی در عرصه‌های پخش سیلاب اجرا شده در استان یزد و همچنین، نفوذپذیری سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده این بود که در عرصه‌های مورد مطالعه نفوذپذیری سطحی در طبقه متوسط تا کم قرار داشته، این موضوع به دلیل ورود رسوبات ریزدانه در حد رس و سیلت به عرصه‌ها و ته‌نشست آن‌ها است. به همین دلیل، با ورود سیلاب در سال‌های بعد، ماندگاری آب در سطح سیستم پخش سیلاب بیشتر شده و میزان تلفات ناشی از تبخیر افزایش می‌یابد. از بین معادلات نفوذ تجمعی مورد بررسی معادلات هورتن و کاستیاکوف-لوئیس بهترین کارایی را در برآورد نفوذ تجمعی در عرصه‌های مورد مطالعه از خود نشان دادند. معادلات نفوذ یادشده می‌تواند در پژوهش‌های جدید به منظور برآورد میزان

منابع مورد استفاده

1. Coleman, E.A. 2008. Comparison of four methods to assess hydraulic conductivity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 22(1): 51-57.
2. Hudson, N.W. 1987. Soil and water conservation in semi-arid areas. FAO, Soil Resources, Management and Conservation Service, 185 pages.
3. Karimi, M., H. Malekineghad, H. Abghari and M. Aziziyan. 2011. Evaluation of the flood hydrograph simulations using the software package HEC-HMS (case study: Watershed Forty Branch). Iranian Journal of Water Research, 15(9): 28-29 (in Persian).
4. Kavusi, S.M., M. Vafakhah and M.H. Mahdian. 2013. Evaluation of some models of water infiltration in the different land uses in Kojour Watershed. Journal of Irrigation and Water Engineering, 14(13): 1-13 (in Persian).
5. Kosar, A. 1995. Introduction to floodwater control and optimal productivity. Research Institute of Forests and Rangelands Publication. 428 pages (in Persian).

6. Mahdian, M.H., R. Sokouti Oskoe and K. Kamali. 2011. Appraisal of the trend of soil infiltration rate changes in flood spreading stations of Iran. *International Journal of Natural Resources and Marine Sciences*, 1(1): 33-43.
7. Mohammadi, M. and V. Refahi. 2005. Estimate of infiltration equation parameters by physical properties soil. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 6(36): 1391-1398 (in Persian).
8. Moradibaseri, H., Sh. Ghorbanidashtaki, H. Khodavardilu, B. Khalil moghadam and J. Givai. 2011. Compare the performance of some models of water infiltration and soil in vertisol and nonvertisol. *Iranian Journal of Water Research*, 15(8): 187-196 (in Persian).
9. Neshat, A. and M. Parekar. 2007. Comparison of methods for determination of vertical infiltration rate of water in the soil. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(3): 1-10 (in Persian).
10. Parchamiaraghi, F., S.M. Mirlatifi, Sh. Ghorbanidashtaki and M.H. Mahdian. 2010. Evaluation models in some textural class and soil infiltration land. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(2): 193-205 (in Persian).
11. Rajaie, S.H., K. Esmaili, A.A. Abbasi and A.N. Ziaei. 2013. Study of permability changes in water spreading projects (case study: Jajarm Projects). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(7): 114-121 (in Persian).
12. Shirzadi, A., K. Chapi and P. Fathi. 2011. Estimates of synthetic unit hydrograph using regional flood analysis and geomorphologic parameters (case study watershed areas Marnj 220 and riders minerals, Kurdistan). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources (Soil and Water Sciences)*, 15(58): 302-343 (in Persian).
13. Vaghefi, M. and M. Movahedzadeh. 2014. Study and comparison of different models of permeability in MandDashti basin using double ring tests results. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 14(15): 5-15 (in Persian).
14. Yukuan, W., F. Bin, X. Pei, W. Daojie, W. Xiantuo and W. Yongqiang. 2007. Validation of three infiltration models on purple soil under simulated rainfall. *Progress in Natural Science*, 1002-0071(9): 1059-1066.
15. Zaremehjardi, M., M.H. Mahdian and J. Barkhordari. 2013. In vestigation Investigation of flood spreading on soil permeability in Sarchahan station, Hormozgan. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 7(20): 1-8.

Archive of SID