بررسی و مقایسه سه مدل مختلف نفوذپذیری با استفاده از نتایج آزمایش‌های استوانهٔ مضاعف
(بررسی موردی محدودهٔ سواحل دو رودخانه در استان بوشهر)

*محمد واقفی: دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر
مالک موحدزاده: دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

تاریخ: دریافت ۹۰/۱۰/۳ **پذیرش** ۹۱/۹/۸

چکیده

نفوذ آب در خاک حوضهٔ آبریز به عوامل مختلفی بستگی دارد. هر حوضهٔ آبریز بنا بر اقلیم و شرایط و ساختمان خاک خاص خود، خصوصیات منحصر به‌فردی دارد. در این تحقیق سواحل دو رودخانهٔ دائمی استان بوشهر (رودخانهٔ مند در شهرستان دشتی و رودخانهٔ باهوش در شهرستان تنگستان) بررسی شده است. میزان نفوذ عمودی آب به خاک با روش آزمایش صحرایی استوانهٔ مضاعف با سه تکرار (در ۱۲۰ چاهک) برای کنترل و تعیین مدل مناسب و محاسبه ضرایب ۳ مدل نفوذپذیری کاستیاکف، فیلیپ و حفاظت خاک آمریکا SCS اندازه‌گیری شد. با استفاده از نرم افزارهای محاسباتی منحنی‌های میزان نفوذ و نفوذ تجمعی رسم شد و برای هر مدل برنامه‌ای به زبان ویژوال بیسیک نوشته شد تا ضریب مدل‌ها با کم‌ترین خطا نسبت به منحنی‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها، به‌عنوان بهترین ضرایب به‌دست آمده تعیین کند. هر برنامه با قرار دادن حالت‌های مختلفی از ضرایب، مدل‌ها را به‌طور مجزا با نتایج آزمایش‌های میدانی تطابق داده و ضمن نمایش میانگین مقدار خطا بهترین ضرایب منطبق با محدودهٔ سواحل رودخانه را به‌عنوان خروجی محاسبات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای محدودهٔ سواحل رودخانه باهوش تنگستان مدل نفوذپذیری حفاظت خاک آمریکا SCS نسبت به مدل فیلیپ و کاستیاکف خطای کم‌تری دارد و مدل فیلیپ نسبت به مدل کاستیاکف و SCS آمریکا تناسب و تطابق بیش‌تری با محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی دارد.

واژه‌های کلیدی: استوانهٔ مضاعف ، باهوش، حوضهٔ آبریز ، مدل‌های نفوذپذیری، مند، نفوذپذیری

*نویسنده مسئول vaghefi@pgu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

مقدمه

ارزیابی میزان نفوذ آب در خاک به‌ویژه در حوضهٔ آبریز رودخانه‌ها اهمیت به‌سزایی دارد. روش‌های فیزیکی نسبتاً ساده‌ای برای تشریح فرایند نقطه‌ای نفوذپذیری وجود دارد، روابط و معادلات مربوط به نفوذپذیری معمولاً به دو روش ارائه شده‌اند. در این میان استفاده از قوانین و روابط اثبات شده مانند قانون بقای جرم و بقای انرژی و تلفیق آن‌ها و در نتیجه دست‌یابی به مجموعه‌ای از معادلات ریاضی مانند معادله فیلیپ و گرین امپت به‌عنوان روابط پیش‌گام، همواره مدنظر محققان قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین حسن این معادلات آن است که بر پایهٔ قوانین فیزیکی وضع شده‌اند؛ عدم دقت کافی در این معادلات که حاصل از ساده‌سازی شرایط فیزیکی و ایده‌آل و یک‌نواخت فرض کردن محیط خاک است را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین نقص آن‌ها قلمداد کرد. شیوهٔ دوم استفاده از روابط تجربی از قبیل هورتون و کاستیاکف است. مهم‌ترین حسن این معادلات دقت زیاد به‌دلیل توجه داشتن به تمام شرایط و عوامل مؤثر در فرآیند نفوذ است. تأثیر گرفتن از شرایط مکـانی و زمانی و نارسـایی شاخص‌های معـادلات در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده این گونه معادلات است. اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک و ارتباط دادن شاخص‌های هیدرولیکی به‌هم می‌توانند در مقایسهٔ معادلات مختلف نفوذ به ما کمک کند [٤].

جلینی (۱۳۷۵) ضمن ارزیابی و تعیین ضرایب پنج مدل نفوذ آب به خاک (کاستیاکف، سازمان حفاظت خاک آمریکا، فیلیپ، کاستیاکف تعدیل شده و هورتون)، تأثیر شرایط سطح خاک روی میزان نفوذ آب به خاک را با استوانه‌های مضاعف بررسی کرد. وی سرعت نهایی نفوذ اندازه‌گیری شده به دو روش استوانه‌های مضاعف و بارشی و نیز بررسی تأثیر ارتفاع ثابت و متغیر آب داخل استوانه میانی در طول مدت اندازه‌گیری و هم‌چنین اثر پوشش گیاهی خاک را بررسی کرد. نتایج نشان داد که شرایط سطح خاک تأثیر چشم‌گیری روی میزان نفوذ داشته است، به‌طوری که در خاک با پوشش گیاهی سرعت نهایی نفوذ و نفوذ تجمعی ۲ تا ۲/۵ برابر بیش‌تر از خاک لخت بود. سرعت نهایی نفوذ اندازه‌گیری شده به روش استوانه مضاعف در خاک لخت ۳ تا ۳/۵ برابر بیش‌تر از روش بارشی بود [۱].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

منصوری (۱۳۷۷) در بررسی و مقایسه شدت نفوذ، نفوذ تجمعی و تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ (گرین و امپت، فیلیپ، کاستیاکف، کاستیاکف تعدیل شده و هورتون) با روش‌های مختلف نفوذسنجی اعم از غرقابی و تحت فشار، در مزرعه مرکز تحقیقات آذربایجان شرقی (خسروشهر) به‌صورت فاکتوریل و با طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی آزمایش‌ها خود را اجرا کرد. فاکتور اول شامل روش‌های مختلف نفوذسنجی، فاکتور دوم شامل دو وضعیت سطح خاک (شخم‌خورده و شخم‌نخورده) و فاکتور سوم اندازه‌گیری با فواصل زمانی ۵ دقیقه بود. نتایج میانگین نفوذ تجمعی بین روش‌های مختلف نفوذسنجی را با اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یا خطای ۵ درصد نشان داد [۵].

محمدی و رفاهی (۱۳۸٤) در تحقیقی با عنوان تخمین پارامترهای نفوذ چند مدل نفوذپذیری در خاک‌های بدون ترک، با محاسبهٔ ضریب پراکندگی برای هر خاک، پارامترهای سه معادله نفوذ معتبر: کاستیاکف، فیلیپ و هورتون را با آماره‌ها و ترکیب آن‌ها با خصوصیات فیزیکی با رگرسیون چندگانه خطی تخمین زدند. نتایج نشان داد که این پارامترها می‌توانند به‌وسیلهٔ ترکیبی از آماره‌های محاسبه شده و خصوصیات فیزیکی که به‌آسانی قابل اندازه‌گیری هستند تخمین زده شوند. هم‌چنین نتایج نشان داد که معادله کوستیاکف تخمین زده شده با داده‌های واقعی رابطهٔ نزدیک‌تری از معادلهٔ فیلیپ تخمین زده شده دارد [٤].

ویسلر و باور (۲۰۰۷) روش‌های محاسبهٔ عددی سرعت نفوذ را با هم مقایسه کردند و چنین اظهار نظر کردند که مقادیر سرعت نفوذ به‌دست آمده از حل عددی معادلهٔ جریان با مقادیر حاصل از آزمایش شباهت و هم‌خوانی نزدیکی دارند اما چگونگی دست‌یابی به پارامترهای مورد نیاز این روش‌ها چندان ساده نیست [۱۷].

وان کوآن جیو و هورتن (۲۰۱۰) از راه حل تحلیلی معادلهٔ لاپلاس برای جریان آب در منطقهٔ اشباع و تجزیه و تحلیل پتانسیل‌های خاک نشان دادند که در دو سطح حفره و حاشیهٔ مرز باریک بین لایه‌های خاک مدل فیلیپ و گرین امپت و گاردنر متفاوت است و می‌توان برای مدل گاردنر دو نوع تیپ خاک را بررسی کرد [۱٦].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

معرفی مختصر مدل‌های نفوذپذیری بررسی شده

مدل کاستیاکف: از جمله معادلات تجربی که قدیمی‌ترین معادلهٔ نفوذ آب به خاک است معادلهٔ کاستیاکف است که در سال ۱۹۳۲ و به‌صورت رابطهٔ (۱) ارائه شده است.

$$I(t) = at^b \qquad (۱)$$

I (t) نفوذ تجمعی، t زمان و a و b ضرایب متفاوتی برای خاک‌های مختلف است و اهمیت فیزیکی نیز ندارند، یعنی مقادیر عددی آن‌ها مبین خصوصیات خاک و به‌ترتیب بزرگ‌تر از صفر و بین صفر و یک است، ولی بعد فیلیپ [۱٤] ضرایب معادلهٔ مذکور را از نظر فیزیکی بررسی کرده و معتقد است که در زمان‌های اولیه (کم‌تر از ده دقیقه) b = ۰/۵ و a برابر با ضریب جذبی خاک (s) است. هارتلی[۱۳] معتقد بود که ضرایب a و b بستگی به زمان نفوذ، درصد رطوبت اولیه و هدایت هیدرولیکی خاک دارند.

مدل فیلیپ: یکی دیگر از مدل‌های نفوذپذیری، مدل فیلیپ است. در این مدل، مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ از مشتق رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود [۱٤].

$$I(t) = St^{0.5} + Kt \qquad (۲)$$

در رابطهٔ فیلیپ S ضریب اشباع خاک بر حسب سانتی‌متر بر جذر ساعت، K هدایت هیدرولیکی بر حسب سانتی‌متر بر ساعت است.

مدل SCS سازمان حفاظت خاک آمریکا[۱]: سازمان حفاظت خاک آمریکا معادلهٔ ساده‌ای را (رابطه ۳) برای تعیین مقدار نفوذ تجمعی آب به داخل خاک ارائه کرده است که به نام معادلهٔ SCS معروف است:

$$I = at^b + 0.6985 \qquad (۳)$$

در این معادله a می‌تواند بر حسب اینچ یا سانتی‌متر (بسته به این‌که i بر حسب اینچ یا سانتی‌متر بیان شود) توصیف گردد. در این مدل به‌کمک منحنی‌ها و جدول ویژه‌ای که سازمان حفاظت خاک آمریکا تدارک دیده است، ضرایب a و b تعیین می‌شود. در معادله این مدل I مقدار نفوذ تجمعی از شروع نفوذ بر حسب سانتی‌متر و t زمان از شروع نفوذ به دقیقه است.

۱. Soil Conservation Services

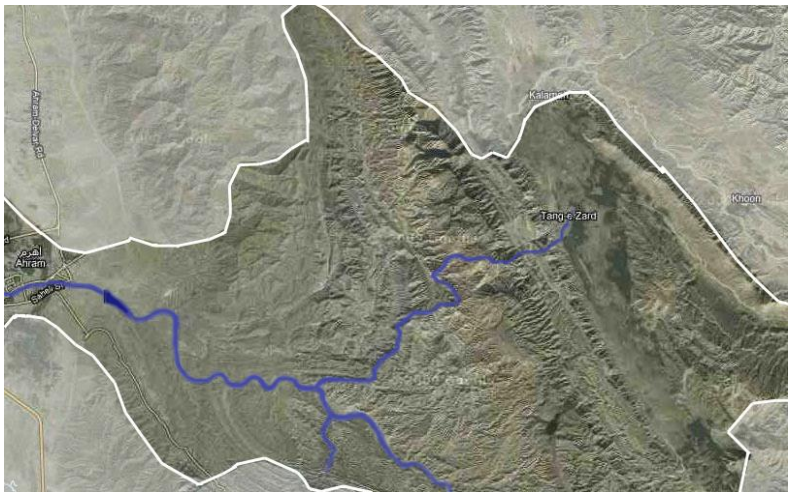
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

a و b ضرایب مربوط به نوع خاک هستند. در هیدرولوژی، برای به‌دست آوردن این ضرایب از آزمایش استوانه مضاعف استفاده می‌شود [۳] .

معرفی حوضه‌های آبریز بررسی شده

حوضهٔ آبریز باهوش: حوضهٔ آبریز باهوش تنگستان به مساحت ۲۰٤۳ کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های آبریز جنوبی کشور (شهرستان تنگستان از توابع استان بوشهر) به‌شمار می‌آید. قسمت اعظم این حوضه را مناطق پرشیب و کوهستانی شکل داده است. شکل ۱ عکس هوایی و جدول ۱ مشخصات و فیزیولوژی حوضهٔ آبریز و جدول ۲ وضعیت شیب این حوضه را نشان می‌دهد [۸] .



شکل ۱. حوضهٔ آبریز باهوش

جدول۱. مشخصات حوضهٔ آبریز باهوش

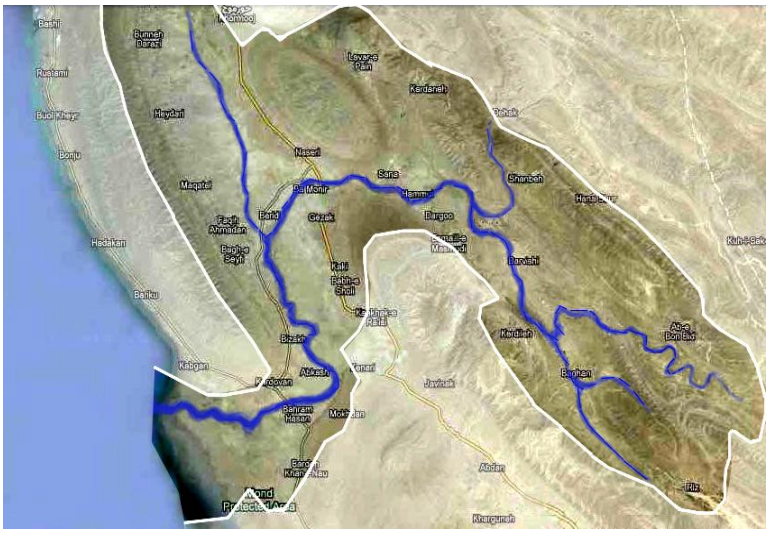
مشخصات	توضیحات
مساحت حوضه	۲۰٤۳ کیلومتر مربع
محیط حوضه	۲۵۱ کیلومتر
طول رودخانه	۱۲۱ کیلومتر
طول جغرافیایی	از ۵۱° ۱۵َ تا ۵۱° ۲۵َ
عرض جغرافیایی	از ۲۸° ٤۸َ تا ۲۸° ۸۵َ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

جدول۲. وضعیت شیب حوضهٔ آبریز باهوش

مقدار شیب	کم‌تر از ۱ درصد	بین ۱ تا ۳ درصد	بین ۳ تا ٥ درصد	بین ٥ تا ۱۰ درصد	بین ۱۰ تا ۱٥ درصد	بین ۱٥ تا ۳۰ درصد	بین ۳۰ تا ٥۰ درصد	بیش از ٥۰ درصد
مساحت (km^2)	۷٤٤	۸۲	۱٤۳	۱۲۲	۳۱۲	٤۰۰	۱٥۲	۳۸۱
درصد	۲٦/٤	۳/۹	۷/۱	٦/٥	۱٥/۲	۱۹/٦	۷/٥	۱۳/۸



شکل ۲. حوضهٔ آبریز مند

حوضهٔ آبریز مُند: حوضهٔ آبریز مُند دشتی با مساحت ۸٥۳۰ کیلومترمربع از حوضه‌های آبریز جنوبی کشور (شهرستان دشتی از توابع استان بوشهر) به‌شمار می‌آید. قسمت اعظم این حوضه را مناطق پرشیب و کوهستانی تشکیل داده‌اند. در شکل ۲ عکس هوایی، جدول ۳ مشخصات فیزیولوژی و در جدول ٤ وضعیت شیب این حوضه نشان داده شده است [۹].

جدول۳. مشخصات و فیزیوگرافی حوضهٔ آبریز مند

مشخصات	توضیحات
مساحت حوضه	۸٥۳۰ کیلومتر مربع
محیط حوضه	٦۹٥ کیلومتر
طول رودخانه	۳۷۰ کیلومتر
طول جغرافیایی	از ´۱۲ °٥۱ تا ´٤٥ °٥۳
عرض جغرافیایی	از ´۱۷ °۲۷ تا ´٤٦ °۲۸

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

جدول٤. وضعیت شیب حوضهٔ آبریز مند

مقدار شیب	کم‌تر از ۱ درصد	بین ۱ تا ۳ درصد	بین ۳ تا ۵ درصد	بین ۵ تا ۱۰ درصد	بین ۱۰ تا ۱۵ درصد	بین ۱۵ تا ۳۰ درصد	بین ۳۰ تا ۵۰ درصد	بیش از ۵۰ درصد
مساحت km^2	۲۲۵۱	۵۰۳	٦٤٨	۱۵۵۳	۱۲۱۱	۱۰۱۵	٦۳۹	۷۰۸
درصد	۲٦/٤	۵/۹	۷/٦	۱۸/۲	۱٤/۲	۱۱/۹	۷/۵	۸/۳

مواد و روش‌ها

از بهترین روش‌های اندازه‌گیری و تعیین میزان نفوذپذیری آب در خاک، انجام آزمایش استوانهٔ مضاعف است. هایس۱ (۱۹۵٦) یکی از کامل‌ترین دستورالعمل‌های استفاده از نفوذسنج استوانه‌ای را ارائه کرده است [۱۲]. در شکل ۳ یک دستگاه استوانه مضاعف در هنگام آزمایش نشان داده شده است.

شکل ۳. دستگاه استوانه مضاعف۲

همهٔ مراحل انجام آزمایش بر اساس استانداردهای بین المللی و استاندارد آمریکا [۱۰] و نشریه شمارهٔ ۲٤۳ وزارت نیرو و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، استاندارد دستورالعمل اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در خاک با روش استوانه مضاعف است [۷]. زمان نفوذ و مقدار نفوذ، نتایج این آزمایش هستند. زمان ثبت شده در هنگام آزمایش بر حسب دقیقه و مقدار نفوذ یا ارتفاع آبی که در زمین نفوذ کرده است بر حسب سانتی‌متر در جداول مربوطه ثبت می‌شود.

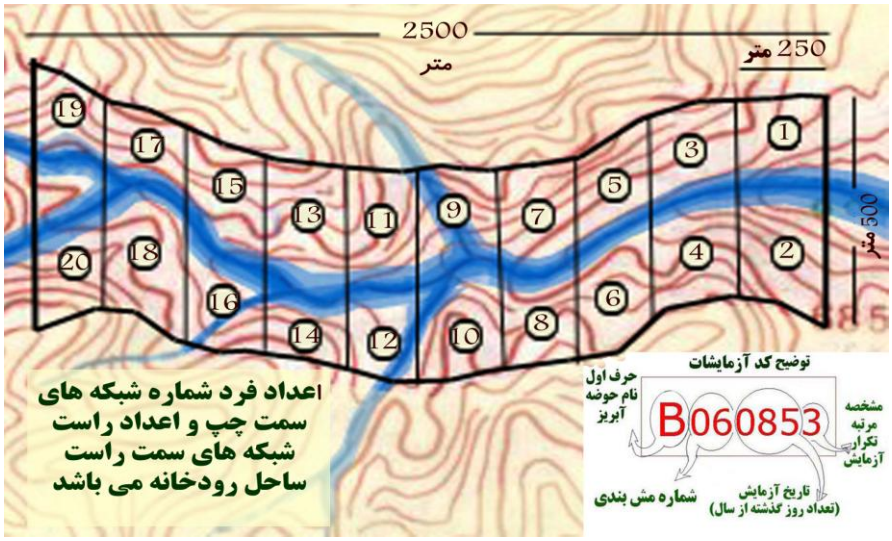
۱. Haise ۲. Double Ring

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی حوضهٔ آبریز بررسی شده (رودخانه مند)، قسمت اعظم این حوضه به لحاظ جنس و بافت و ساختمان خاک مشابهند. اما عوامل دیگری مثل شیب و پوشش گیاهی و وضعیت سطح زمین این رودخانه تقریباً متفاوت است. در این تحقیق محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان و مند دشتی بررسی شد. برای انتخاب حوضهٔ معرف ابتدا کل مسیر رودخانه بازدید شد سپس با در نظر گرفتن سایر عوامل و خصوصیات، منطقه برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد.

محدوده‌ای به طول۲۵۰۰ متر از مسیر رودخانه (طول شبکه) و ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر از محور رودخانه در ساحل پیرامونی (عرض شبکه) به‌عنوان محدودهٔ برداشت آزمایش‌ها انتخاب شده است. برای اتخاذ شبکه‌بندی مناسب، در طول این محدوده، به ازای هر ۲۵۰ متر طول، خطی فرضی عمود بر مسیر رودخانه انتخاب گشته است تا منطقهٔ پژوهش به ۱۰شبکه یا نوار ۱۰۰۰ × ۲۵۰ متری تبدیل شود. شکل ٤ شبکه‌ها و کدهای نام‌گذاری شبکه‌ها را نشان می‌دهد.



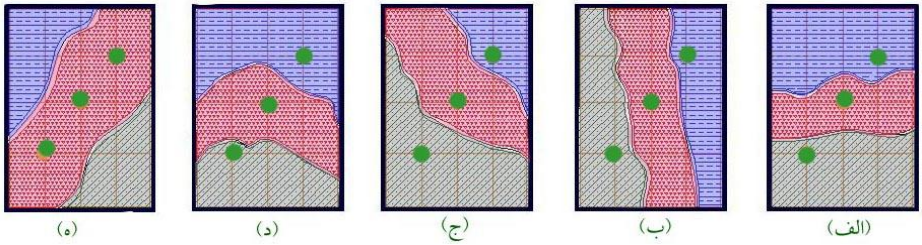
شکل ٤. انتخاب فاصلهٔ از محور رودخانه و نمایش شبکه‌بندی

رئوس شبکه‌ها با خطای کم‌تر از ۳ متر به‌کمک GPS نقطه‌یابی و مختصات آن برای بررسی‌ها و محاسبات بعدی ثبت شده است. در این مساحت حدود ۱۲/۵ هکتاری با سه بار تکرار، آزمایش‌های نفوذپذیری با استوانهٔ مضاعف انجام شده است. انتخاب مکان و زمان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

آزمایش‌ها نیز بر اساس جدول زمانی با شکل خاصی انجام شده است و در این راستا شبکه‌ها مستطیلی شکل به‌کار گرفته شده و در امتداد یک قطر مستطیل در حد فاصل مناسب، نقاط برداشت انتخاب شده است. علت این نوع انتخاب آن است که اگر جنس و بافت یا ساختمان خاک در نوارهای طولی یا در نوارهای عرضی یک‌سان باشد، برداشت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده باشند تا نتایج هر نوار عرضی یا طولی در آن موجود باشد، به‌عبارت دیگر از همهٔ گونه‌های خاک آن شبکه، حداقل یک برداشت صورت گرفته باشد. اگر سه نقطه برداشت داده (انجام آزمایش) در یک مسیر طولی یا عرضی قرار بگیرد، این امکان وجود دارد که با توجه با لایه‌لایه بودن و وضعیت قرار گرفتن لایه‌ها بافت هم‌سانی در نوار عرضی یا طولی اتفاق بیفتد، در نتیجه برداشت داده در لایه‌های مختلف صورت نگیرد. از همین رو با توجه به شکل ۵ سه نقطه در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش‌ها در این شبکه‌های مستطیلی، امکان برداشت آزمایش در خاک با بافت یک‌سان کم‌تر است. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود تنها در حالت (ه) امکان یک‌سان بودن بافت خاک وجود دارد.



شکل۵. تحلیل انتخاب محل مناسب برای آزمایش

برای برداشت هر آزمایش یک چاهک به عمق ۱ متر و ابعاد حدودی ۱ × ۱ متر حفر شده است و آزمایش دانه‌بندی و اندازه‌گیری رطوبت اولیه خاک با استفاده از نمونه‌های ته چاهک انجام شده است.

برای نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری با استوانه مضاعف، منحنی نفوذ تجمعی و منحنی سرعت نفوذ رسم شده است. بدین‌ترتیب ابتدا برداشت‌های تکرار از هر چاهک با هم مقایسه شده و سپس به میانگین سه تکرار آزمایش، به‌عنوان برداشت اصلی توجه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

شده است. منحنی‌های نرخ نفوذ و منحنی‌های نفوذ تجمعی با نرم افزارهای اکسل[۱] و تابل کرو[۲] و کرو اکسپرت[۳] رسم گردیده است. مدت زمان آزمایش‌ها ۳ ساعت است و در ١٤ زمان مشخص و تعیین شده قرائت‌ها انجام گرفته است.

از منابع متعدد و تحقیقات انجام شده [۲]، [٤]، [٦]، [۱۱]، [۱٥] و هم‌چنین به روش سعی و خطا مقدار حداکثر و حداقل ضـرایب این دو مـدل تعیین شد سپس با ویژوال بیسیک[٤] برنامـه‌های جـداگانه‌ای برای این مـدل‌ها کد نویسی شد. این برنامه‌ها ابتدا ۱۰۰ عدد را بین حداکثر و حداقل هر ضریب تعیین کرده است و سپس به تعداد $۱۰۰^۳$ حالت این ضرایب را در نظر گرفته و زمان‌های داده شده در آزمایش‌ها را در معادلهٔ خود قرارداده و خروجی‌های (محاسبه) را با نتایج آزمایش مربوط (مشاهده) مقایسه می‌کنند. سرانجام با استفاده از روش کم‌ترین مربعات[٥] حالتی از ضرایب، که کم‌ترین خطا و بیش‌ترین تبیین را نشان می‌دهد، تعیین کرده و ضرایب مربوط و میزان خطا مربوط را به‌عنوان خروجی خود نشان می‌دهند. این برنامه‌های کامپیوتری علاوه بر قابلیت بیش از میلیون‌ها محاسبه، قادرند تا دامنهٔ اعداد ضرایب را تغییر دهند و از میزان خطای محاسبه شده در مقایسه با نتایج تجربی بهترین دامنهٔ تغییرات اعداد را برای ضرایب تعیین کنند.

نتایج و بحث

نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمایش‌های استوانه مضاعف به‌صورت جداگانه (٦۰ آزمایش برای هر ساحل رودخانه) در برنامه کامپیوتری تهیه شده قرارداده شد و بیش‌ترین و کم‌ترین و میانگین خطا و بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین و میانگین یا بهترین ضرایب هر مدل به‌طور جداگانه تعیین شد. در جدول ٥ بهترین ضرایب به‌دست آمده مدل‌های بررسی شده و میزان خطای آن‌ها در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان و جدول ٦ بهترین ضرایب به‌دست آمده مدل‌های بررسی شده و میزان خطای آن‌ها در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند را نشان می‌دهد.

---

۱. Excel ۲. Table Curve ۳. Curve Expert ٤. Visual
٥. Basic ۶. The Least Square Method

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

جدول ۵. بهترین ضرایب مدل‌های نفوذپذیری محاسبه شده محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش

نام مدل	میانگین خطا	معادله مدل
کاستیاکف	۸/۷	$F = 0.694\ t^{0.537}$
فیلیپ	۸/٦۲	$F(t) = 0.689\ t^{0.5} + 0.0184\ t$
حفاظت خاک آمریکا	۸/۵۳	$F = 0.089\ t^{0.799} + 0.6985$

جدول ٦. بهترین ضرایب مدل‌های نفوذپذیری محاسبه شده محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند

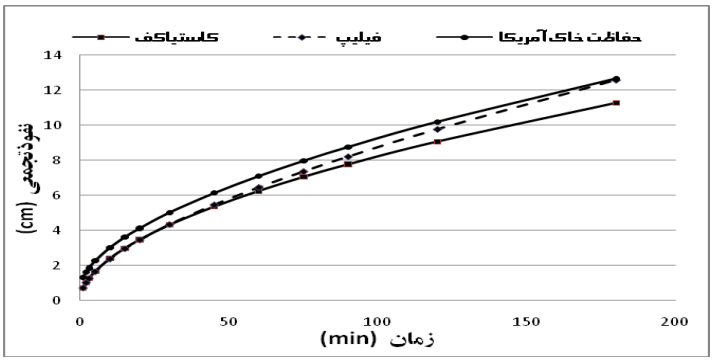
نام مدل	میانگین خطا	معادله مدل
کاستیاکف	۱٦/۲	$F = 0.883\ t^{0.66}$
فیلیپ	۱۳/۷۲	$F(t) = 1.43\ t^{0.5} + 0.347\ t$
حفاظت خاک آمریکا	۱٦/۳۲	$F = 0.181\ t^{0.751} + 0.6985$

این جدول‌ها نشان می‌دهند که هر سه مدل بررسی شده برای محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان نسبت به محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی خطای کم‌تر و انطباق بهتری دارد.

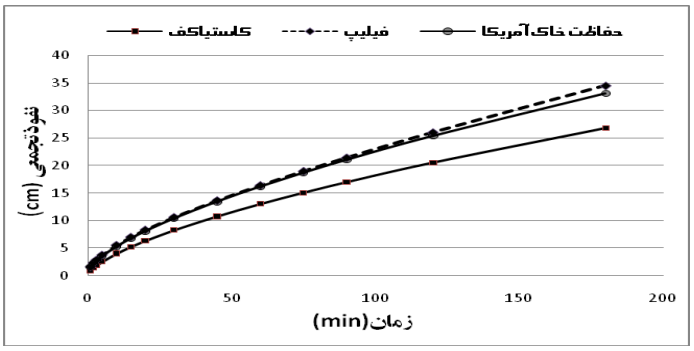
در میان ٦۰ چاهک آزمایش در هر ساحل رودخانه میزان نفوذپذیری‌های متعددی به‌صورت میدانی در نقاط مشخصی از حوضه‌ها برداشت شد. پس از حذف موارد جزئی از نتایج آزمایش‌ها تقریباً استثنایی یا غیرقابل قبول، میزان نفوذ تجمعی میانگین حوضه محاسبه شد. شکل ۵ منحنی نفوذ تجمعی این سه مدل بررسی شده را در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان بر اساس بهترین ضرایب به‌دست آمده از برنامه‌های کامپیوتری را نشان می‌دهد. شکل ٦ نیز منحنی‌های مذکور را در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ و شکل ٦ مشاهده می‌شود که محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند نسبت به محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش دارای نفوذپذیری بسیار بیش‌تری بوده است. هم‌چنین می‌توان دریافت که مدل کاستیاکف در هر دو حوضه میزان نفوذ تجمعی را نسبت به مدل‌های فیلیپ و حفاظت خاک آمریکا کم‌تر نشان می‌دهد. از آن جا که میزان خطا در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی نسبت به محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان بیش‌تر است می‌توان دریافت که هر چه نفوذپذیری یک حوضه آبریز کم‌تر باشد مدل‌های نفوذپذیری تناسب و تطابق بیش‌تری دارد و محاسبات مربوطه دارای خطای کم‌تری است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]



شکل ٦. منحنی نفوذ تجمعی مدل‌های نفوذپذیری در حوضهٔ آبریز باهوش



شکل ۷. منحنی نفوذ تجمعی مدل‌های نفوذپذیری در حوضهٔ آبریز مند

چنان‌که در شکل ٦ و ۷ مشاهده می‌شود می‌توان گفت به‌طورکلی منحنی مدل‌های نفوذپذیری بسیار به هم نزدیکند و اختلاف چشم‌گیری ندارند. با توجه به تعدد آزمایش‌ها و نتایج مختلف تجربی حاصل از آزمایش‌ها، نمی‌توان تنها یک منحنی به‌عنوان منحنی شاهد یا میانگین مشاهدات رسم کرد اما با دقت در شکل‌های ٦ و ۷ و با در نظر گرفتن میزان خطاها در جدول‌های ٥ و ٦ می‌توان روند تغییرات میزان نفوذ آب در خاک این دو حوضه را تصور کرد. آزمایش‌های تجربی انجام گرفته و محاسبات مدل‌های بررسی شده نشان می‌دهد که در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان با گذشت مدت زمان ۳ ساعت حدود ۱۲ سانتی‌متر و در محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی در همین مدت زمان حدود ۳٥ سانتی‌متر آب به درون زمین نفوذ کرده است. هم‌چنین از روی شیب منحنی‌های به‌دست آمده می‌توان دریافت که روند کاهشی نفوذ در زمان‌های طولانی در محدودهٔ سواحل رودخانه باهوش محسوس‌تر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام ۱۲۰ آزمایش نفوذپذیری به‌صورت میدانی با استفاده از آزمایش‌های استوانهٔ مضاعف طی سه مرتبه تکرار آزمایش‌ها، سواحل دو رودخانهٔ دائمی استان بوشهر (حوضهٔ آبریز باهوش تنگستان و مند دشتی) بررسی شد. بهترین ضرایب مدل‌های نفوذپذیری کاستیاکف و فیلیپ و حفاظت خاک آمریکا برای دو محدودهٔ سواحل رودخانه محاسبه شد. نتایج محاسباتی و تجربی نشان داد که محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی نسبت به محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان بسیار نفوذپذیرتر است. برای محدودهٔ سواحل رودخانهٔ باهوش تنگستان مدل SCS آمریکا و فیلیپ و کاستیاکف به‌ترتیب با خطای ۸/۵۳ و ۸/٦۲ و ۸/۷۹ بیش‌ترین تطابق و مناسب‌ترین مدل‌ها، هم‌چنین به‌ترتیب مدل فیلیپ و کاستیاکف و SCS آمریکا با خطای ۱۳/۷ و ۱٦/۰۲ و ۱٦/۳۲ مناسب‌ترین مدل‌های نفوذپذیری برای محدودهٔ سواحل رودخانهٔ مند دشتی تعیین شد.

منابع

۱. جلینی، م.، *تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ آب به خاک در خاک‌های اراضی کرج*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، (۱۳۷۵) ۱۷۱-۱۷۳.

۲. رهنما، محمدباقر، و رضایی‌مقدم، حمید، *تعیین ضرایب مدلهای نفود و معادلات نفوذ آب درخاک در دشت‌های اطراف معدن سنگ اهن گل گهرسیرجان (دشت قطاربنه)*، نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، نشریه آبیاری، ۳۲٦ (۱۳۸٦) ۹ و ۱۷.

۳. علیزاده، امین.، *اصول هیدرولوژی کاربردی*، چاپ هیجدهم، انتشارات آستان قدس رضوی دانشگاه امام رضا (ع)(۱۳۸٤) ۳۰۵-۳۰۸.

٤. محمدی، محمدحسین و رفاهی، حسینقلی، *تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک*، مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۳٦. مقاله شماره ٦ (۱۳۸٤) ۳۱ و ۳۷.

۵. مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان بوشهر، *مطالعات حوضه آبریز باهوش شهرستان تنگستان*، دفترچهٔ مطالعاتی شمارهٔ ۷۲/۱۲٤ ک (۱۳۷۸).

٦. مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان بوشهر، *مطالعات حوضهٔ آبریز مند شهرستان دشتی*، دفترچهٔ مطالعاتی شمارهٔ ۷۲/۱۲۵ ک (۱۳۷٦).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]

۷. منصوری، حامد، *مقایسه معادلات شدت نفوذ و نفوذ تجمعی با نتایج آزمایش‌های استوانه مضاعف*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اصفهان (۱۳۷۷) ۱۹۵–۱۹٦.

۸. نشاط، ع. پاره کار. م.، *مقایسهٔ روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک*، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد چهارم، مقاله شمارهٔ سوم (۱۳۸٦) ۱۱۸ و ۱۲٤.

۹. وزارت نیرو و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، نشریهٔ شمارهٔ ۲٤۳، *استاندارد دستورالعمل اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در خاک با روش استوانه* (۱۳۸۰).

10. American Society for Testing Materials, "Standard Test Method for Particle- Analysis of Soils", D422-63 (1998).

11 .Chow V. T., Maidment D. R., Mays L.W, "Applied Hydrology" cGraw-Hill Book Co., Newark (1989) 572.

12. Haise R, T., "High rote artificial ground water recharge at Peoria", Illinois, U. S. A., AIHS, Rome (1956).

13. Hartley D. M., "Interpretation of Kostiakov Infiltration parameters for Borders", J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 118 (1) (1992) 156-164.

14. Philip J. R., "An Infiltration Equation with physical Significance", soil science 77 (2) (1954) 153-7.

15. Singh V. P. F. X. Y. U., "Derivation of Infiltration Equation Using Systems Approach" , J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.116, no.6 (1990) 320

16. Wang.Quan-Jiu1, R. Horton, "An Analytical Solution for One-Dimensional Water Infiltration and Redistribution in Unsaturated Soil", ISSN 1002-0160/CN 32-1315/P, 2009 Soil Science Society of China (2010).

17. Voisoler M, Bauer S. W., "Use of Principal Components Scores in Multiple Linear Regression Models for Prediction of Chlorophyll-a in Reserves", Ell Model,181 (2007) 581-589.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.6.8]