

مقاله پژوهشی

معرفی مدلی برای استحصال آب با توجه به ساختارهای متناسب با شرایط طبیعی

محمد رضا حامی کوچه باغی^۱، تیمور سهرابی^{۲*}، آرزو نازی قمشلو^۳، علی رضا توکلی^۴

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۱

- ۱- دانشجو دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تهران.
 - ۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
 - ۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
 - ۴- دانشیار پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
- *مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: myousef@ut.ac.ir

چکیده

اهداف مدیریت خاک، به حداکثر رساندن ذخیره آب و مواد مغذی گیاه و به حداقل رساندن فرسایش خاک و یا بهبود باروری و شرایط فیزیکی خاک است. استفاده از روش‌های استحصال آب در محل، روانابی که از منطقه خارج می‌شود را کاهش و آب ذخیره شده در پروفیل خاک را افزایش می‌دهد. استحصال آب باران مفهوم جدیدی نیست ولی نیازمند ترکیب روش‌های بومی با دانش‌های مدرن می‌باشد. برخی از پروژه‌های استحصال آب با موفقیت چندان همراهِ نبوده‌اند و یا حتی منجر به از بین رفتن کل محصول گردیده‌اند، چراکه تکنولوژی مورد استفاده برای شرایط ویژه منطقه نامناسب بوده است. مناسب بودن یک منطقه برای استحصال آب باران بستگی به توانایی آن در برآورد نیازهای فنی و اولیه سیستم دارد. هدف از این تحقیق معرفی روشی برای استحصال آب باران در دشت‌هایی با شیب کم و یا بدون شیب می‌باشد که قابلیت احداث به صورت مکانیزه در سطح وسیع داشته باشد. از طرفی اقدام به تبیین و معرفی روشی برای طراحی دقیق و علمی یک سیستم استحصال آب، با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری شده است که تاکنون تلاش‌های زیادی در این زمینه صورت نگرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر کاهش توان متمرکز نمودن آب توسط سیستم کجاوه، با کاهش ابعاد ساختار می‌باشد. همچنین کاهش توان متمرکز نمودن آب توسط سیستم کجاوه در ساختارهایی با ابعاد نسبی کوچکتر برای بارندگی‌هایی با شدت‌های بارش بالا توسط شبیه‌سازی پیش‌بینی گردید. چنین روندی برای بارش‌های طولانی مدت (ویژه در شدت بارش کم) نیز قابل انتظار است.

واژه‌های کلیدی: استحصال آب باران، سیستم کجاوه، شبیه‌سازی، شدت بارش، شیب، طول زمان بارش، نفوذ.

Development of a Model for the Water Harvesting According to the Structures Appropriate for Natural Conditions

Mohammad Reza Hami Kouchebaghi¹, Teymour Sohrabi^{2*}, Arezoo Nazi Ghameshlou³, Ali Reza Tavakoli⁴

Received: 2019-09-29

Accepted: 2021-01-10

1-Ph.D. Student, Dept. of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, Univ. of Tehran, Karaj, Iran.

2-Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, Univ. of Tehran, Karaj, Iran.

3-Assist. Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture and Natural Resources, Univ. of Tehran, Karaj, Iran.

4-Assoc. Prof. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

Corresponding Author, E-mail: myousef@ut.ac.ir

Abstract

The purpose of soil management is maximizing the supply of water and nutrients to the plant and minimizes the soil erosion, improve soil fertility and soil physical conditions. Using in-site water harvesting methods reduces runoff from the area and increases the water stored in the soil profile. Rainwater harvesting is not a new concept, but it requires the combination of native methods with modern knowledge. Because the used technology was inappropriate for special conditions of the region, some water harvesting projects have been unsuccessful or even led to the loss of the whole crop. The suitability of an area for rain water harvesting depends on its ability to supply the technical and basic needs of the system. This study introduces a method for rain water harvesting in the area with little slope or no slope, which can be mechanized construction for large-scale. On the other hand, a computer simulation has been prepared and introduced for precise and scientific designing of a water harvesting system, which there has not been much effort in this case. The results of simulation indicated the reduction of concentration ability of water by Kajaweh system with decreasing the size of structure. In addition, in relatively smaller sized structures under high rainfall intensity, reduction of water concentration ability by Kajaweh system was predicted by simulation. Such trend is also expected for long time rainfall times (especially in low rainfall intensity).

Keywords: Infiltration, Kajawe system, Rainfall duration, Rainwater harvesting, Rainfall intensity, Simulation, Slope.

مقدمه

مداخله صورت گیرد (اویس ۲۰۰۱). هزاران سال پیش در مناطق خشک استحصال آب باران وجود داشته است و معیشت مردم در مناطق خشک و نیمه خشک را تامین می‌کرد اما به دلایل مختلف این عرف به طور پیوسته کاهش یافته است. اعتقاد بر این است که در اردن ساختارهای استحصال آب باران به بیش از ۹ هزار سال قبل بر می‌گردد. شواهدی نشان می‌دهد که تکنیک‌های استحصال آب باران در جنوب بین‌النهرین از ۴۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح مورد استفاده قرار گرفته است. در

فناوری‌های استحصال آب باران در مزرعه می‌تواند کارایی مصرف آب را افزایش دهد. اهداف مدیریت خاک به حداکثر رساندن تامین آب و مواد مغذی گیاه و به حداقل رساندن فرسایش خاک و یا بهبود باروری خاک و شرایط فیزیکی خاک است (ماتی ۲۰۰۶). استحصال آب باران بر اساس محروم کردن بخشی از زمین از سهم باران خود و اضافه کردن آن سهم به بخش دیگر است. استحصال آب باران ممکن است به صورت طبیعی یا با

مختلفی از سیستم‌های جمع‌کننده بزرگ وجود دارد نظیر مخازن کوچک مزرعه، کشت در بستر مسیل، جسور، خاکریزهای بزرگ، مخازن آب و آب انبارها و غیره (اویس ۲۰۰۱؛ دورگا رائو و همکاران ۲۰۰۵).

جمع‌کننده‌های کوچک^۴

در این روش رواناب سطحی از یک حوزه کوچک و در مسافت‌های کوتاه جمع‌آوری می‌شود و آب به یک منطقه کشت شده در مجاورت محل جمع‌آوری منتقل و استفاده می‌شود. این سیستم خود زیر شاخه‌هایی دارد نظیر سیستم داخل مزرعه که دارای طراحی ساده و کم هزینه است و به راحتی قابل تکرار و انطباق پذیر می‌باشد. این سیستم‌ها دارای بهره‌وری بالاتری در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشند و معمولاً نیاز به انتقال آب وجود ندارد. هر سه بخش جمع‌کننده، محل ذخیره و هدف در داخل مزرعه قرار دارد و باعث ایجاد مزیت از نظر نگهداری و مدیریت می‌گردد ولی باعث از دست رفتن بخشی از زمین مولد می‌گردد و تنها در مناطق خشک که کشاورزی دارای ریسک بالایی است چنین سیستم‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع مختلفی از سیستم‌های داخل مزرعه وجود دارد نظیر شیار کنتوری، نوارهای نیم دایره‌ای و نوزنقه‌ای، چاله‌های کوچک، حوضچه کوچک رواناب، نوارهای روان آب، سیستم داخل ردیفی، مسکات و تراس‌های کوچک و غیره (پرینز ۲۰۰۱؛ وولند و بری ۲۰۰۹).

ساختار کجاوه یک سیستم جمع‌آوری آب است که برای مناطق کم‌شیب معرفی شده و فرمول بندی می‌گردد. سیستم کجاوه از چهار مثلث متساوی‌الاساقین تشکیل شده است که در کنار هم یک هرم با قاعده مربع را تشکیل می‌دهد. سطح جمع‌کننده آب باران S_{in} ثابت است و با عمق حفره تغییر نمی‌یابد و برابر است با

یمن سیستمی که به حدود هزار سال قبل از میلاد مسیح برمی‌گردد رواناب را برای آبیاری ۲۰ هزار هکتار زمین هدایت می‌کرده و غذای بیش از ۳۰۰ هزار نفر را تامین نموده است. در بلوچستان پاکستان خوسکابا^۱ و سیستم‌های جمع‌آوری سیلاب از دوران باستان تا کنون مورد استفاده می‌باشد. حتی در دوران پیش از رومیان تکنیک‌های استحصال آب در شمال آفریقا به طور گسترده‌ای استفاده می‌شده است در مراکش انواع مختلفی از تکنیک‌های استحصال آب باران هنوز هم وجود دارد. در تونس سیستم آبیاری به نام مسکات^۲، جسور^۳ و مگود^۴ از گذشته تا حال مورد استفاده می‌باشد (مرا و آهامد ۲۰۰۶؛ نولد ۲۰۰۷؛ وورم و هاتوم ۲۰۰۶) که برای جلوگیری از اطاله کلام از توصیف جزئیات این روش‌ها می‌پرهیزیم.

اجزای اصلی سیستم استحصال آب باران شامل جمع‌کننده، محل ذخیره و منطقه هدف است (کریشلی و سیگارت ۱۹۹۱). جمع‌کننده قسمتی از زمین است که بخشی از سهم یا کل سهم خود از آب باران را به یک منطقه هدف می‌بخشد (بوئرز و بن-آشر ۱۹۸۲). محل ذخیره جایی است که آب در آن جمع‌آوری می‌شود و تا زمان استفاده در آن نگهداری می‌شود. منطقه هدف جایی است که آب در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (اویس ۲۰۰۱). روش‌های استحصال آب باران به گونه‌های مختلف طبقه بندی می‌شود که عمدتاً بر اساس نوع استفاده، روش ذخیره یا اندازه جمع‌کننده‌ها می‌باشد. یک روش تقسیم بندی به شرح زیر است:

سیستم‌های جمع‌کننده بزرگ^۵

در این روش جمع‌آوری آب از سطح وسیعی صورت می‌گیرد. حوزه‌های جمع‌کننده معمولاً زمین‌های طبیعی و کوهپایه‌ها هستند و بخش جمع‌کننده خارج از مرزها قرار دارد و کشاورزان کنترلی بر آن ندارند. انواع

⁴ Mgoud

⁵ Macro catchment

⁶ Micro catchment

¹ Khuskaba

² Meskat

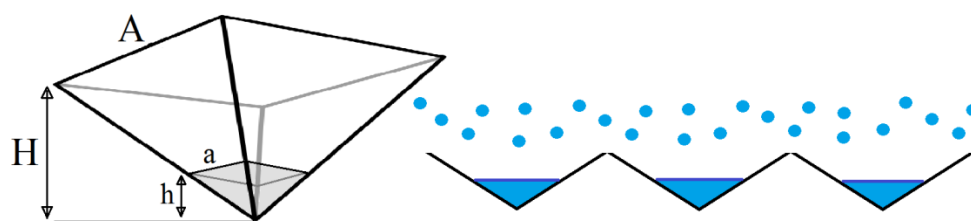
³ Jessour

در نتیجه میزان آب نفوذ یافته نیز در نقاط مختلف متفاوت است. آزمایش‌های اولیه حاکی از موثر بودن چنین ساختارهایی در ایجاد تمرکز مورد نظر از آب در محل مورد نظر بوده است.

گیاه در محلی که بیشترین نفوذ آب وجود دارد یعنی مرکز حفره کاشته می‌شود. حجم آب جمع شده در مرکز حفره به شدت بارش، طول زمان بارش، شیب دیواره‌های جمع کننده آب، جنس خاک و میزان فشردگی سطح خاک بستگی دارد. با توجه به حجم آب جمع شده، ارتفاعی از آب در مرکز حفره قرار خواهد داشت (h) که با عمق حفره متناسب است (رابطه ۵) و از طریق ارتباط حجم آب جمع شده با مشخصات حفره‌ها (رابطه ۴) تعیین می‌شود.

$$a = \left(3 \times \frac{A}{H} \times V_v \right)^{\frac{1}{3}} \quad [4]$$

$$h = a \times \frac{H}{A} \quad [5]$$



شکل ۱- طرح شماتیک حفره‌ها به صورت هرم معکوس.

کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد. از سوی دیگر می‌توان از این ساختار برای کاهش رواناب سطحی بمنظور کاهش فرسایش خاک و افزایش یکنواختی توزیع در سیستم‌های آبیاری بارانی استفاده کرد. همچنین با کاهش رواناب سطحی و تمرکز آب در یک منطقه می‌توان تغذیه آبهای زیرزمینی را نیز مدنظر قرار داد. بیشترین طرح‌های سیستم‌های استحصال آب باران در مناطق شیبدار و کوهپایه‌ای شکل گرفته‌اند و از شیب زمین برای

مساحت مربعی با ضلعی برابر با طول قاعده هرم A (شکل ۱).

$$S_{in} = A^2 \quad [1]$$

حجم آب ورودی در هر حفره برابر است با مساحت S_{in} ضرب در شدت بارش I ضرب در طول مدت بارندگی T_i .

$$V_T = S_{in} \times I \times T_i \quad [2]$$

در این مدت مقداری از این حجم آب در خاک نفوذ می‌کند و اگر شدت بارش بیشتر از نرخ نفوذ آب در خاک باشد مقدار اضافی بارش نسبت به نفوذ به صورت روان آب در جهت شیب حرکت کرده و در مرکز حفره جمع می‌شود که برابر است با.

$$V_v = V_T - V_i \quad [3]$$

تا زمانی که بارندگی ادامه دارد نفوذ آب در کل سطح ساختار وجود دارد ولی پس از اتمام بارندگی تنها در بخش مرکزی حفره که هنوز آب ناشی از رواناب در آن قرار دارد نفوذ آب رخ می‌دهد. بدین ترتیب طول زمان تماس آب با خاک در نقاط مختلف متفاوت خواهد بود و

در این رابطه، A طول قاعده هرم اصلی، H عمق هرم اصلی، a طول قاعده هرمی که در انتهای بارندگی آب در آن جمع می‌شود و h ارتفاعی از آب که در مرکز حفره در انتهای بارندگی قرار دارد می‌باشد. با گذشت زمان، نفوذ آب از سطوحی که با آب جمع شده در تماس است ادامه خواهد داشت و به مرور زمان حجم باقیمانده آب کم شده و در نهایت به صفر می‌رسد. با کاهش حجم آب به علت نفوذ از سطح در تماس با آب، عمق آب نیز

بیشتر از آستانه ایجاد رواناب مورد نظر است، آب بیشتری در مرکز حفره جمع خواهد شد.

هدف از این تحقیق معرفی روشی برای استحصال

آب باران در دشتهایی با شیب کم و یا بدون شیب می-باشد که از بررسی روش‌های مختلف استحصال آب باران و ادغام و اصلاح آنها به دست آمده است و قابلیت احداث به صورت مکانیزه در سطح وسیع وجود دارد. در این پژوهش سعی بر طراحی این ساختارها با توجه به شرایط اقلیمی (نظیر شدت بارش، طول مدت بارش، زمان بارش، سرعت باد و ...)، جنس خاک و مشخصات گیاه کشته شده. شرایط آب و هوایی و خاک در کنار مشخصات گیاه مورد نظر برای کشت، متغیرهای اصلی برای طراحی سیستم است که با توجه به کمیت‌های ثابت نظیر شدت، مدت و طول زمان بارندگی و جنس خاک تعیین می‌گردند. بدین منظور نیاز به درک تاثیر کمیت‌های متغیر با توجه به کمیت‌های ثابت بر روی میزان آب متمرکز شده در منطقه هدف می‌باشد. از طرفی برای طراحی بهینه ساختاری، بگونه‌ای که بیشترین راندمان استفاده از آب باران را داشته باشیم اقدام به انجام شبیه-سازی رفتار این ساختار شد که این کار در نوع خود جزء اولین تلاش‌های در این زمینه می‌باشد.

مواد و روشها

حفره‌هایی به صورت هرم معکوس با قاعده مربع در کنار هم قرار گرفته و ساختارهایی برای جمع آوری آب باران و متمرکز نمودن آن در یک نقطه ایجاد می‌شود. این ساختار در حیطه سیستم‌های استحصال آب با جمع کننده کوچک قرار دارد و آب را در پروفیل خاک و در منطقه رشد ریشه ذخیره می‌کند. برای فهم بیشتر سیستم، اقدام به طراحی آزمایش با یک کمیت متغیر شده است و از نتایج آنها برای فهم تاثیر این کمیت استفاده می‌شود.

انجام آزمایش

آزمایشی به منظور بیان مسئله و بررسی اولیه ساختار کجاوه صورت گرفت. آزمایش شامل ۴ تیمار مختلف می‌باشد که مشخصات هر تیمار در جدول ۱ آمده

ایجاد رواناب و تمرکز آن در مکان مورد نظر استفاده کرده‌اند. سیستم کجاوه برای مناطق کم‌شیب معرفی شده و فرمول بندی می‌گردد.

عوامل تاثیرگذار در کارایی سیستم کجاوه

شدت بارش

آستانه‌ای از شدت بارش برای ایجاد رواناب مورد نیاز است که کمتر از آن روان آب ایجاد نمی‌شود (ماسیلا و همکاران ۲۰۱۵). این مقدار با نرخ نفوذ خاک و مشخصات سطح خاک از جمله شیب و ضریب زبری متناسب است. تحقیقاتی انجام شده است که حاکی از ایجاد رواناب در بارندگی‌هایی با شدت کمتر از نرخ نفوذ درخاک‌هایی با سطح شیب دار می‌باشد (موربدلی و همکاران ۲۰۱۶). از آنجایی که در این تحقیق، نرخ نفوذ مستقل از شدت بارش فرض شده‌است، هر چه شدت بارش افزایش یابد، میزان رواناب افزایش خواهد یافت و از آنجایی که باران‌های شدید کوتاه مدت است (دبیری و همکاران ۲۰۱۶) حجم کل آب جمع شده در چنین بارش-هایی بیشتر از بارندگی با همان حجم بارش و با شدت کمتر خواهد بود. تاثیر شدت بارش بر میزان نفوذ به خوبی مشخص نشده است (عبدالله و همکاران ۲۰۱۶).

طول زمان بارندگی

حجم آب ورودی علاوه بر شدت بارش به طول زمان بارندگی نیز وابسته است و برابر است با حاصل ضرب شدت بارش، طول زمان بارش و اندازه سطح مورد نظر (حجم آب ورودی = طول زمان بارندگی * شدت بارش * سطحی که باران در آن می‌بارد). در یک سطح مشخص و با افزایش طول زمان بارندگی، نفوذ آب در سطوح جمع کننده افزایش می‌یابد و توزیع غیر یکنواخت و متمرکز آب که مورد نظر است مختل می‌شود.

ابعاد قاعده هرم

با افزایش ابعاد قاعده هرم سطحی که باران به آن می‌بارد افزایش یافته و در نتیجه ورودی کل آب افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد سطوح جمع کننده آب، سطوح نفوذ نیز افزایش می‌یابد ولی از آنجایی که شدت بارش

است. در هر تیمار ساختارهای متشکل از ۱۵ هرم ایجاد شده و چاله مرکزی مورد اندازه گیری قرار گرفت. اندازه گیری ابعاد هرم‌ها در وسط هرم انجام شد که ابعاد هرم قبل از آزمایش را مشخص کرد. زمان شروع آبیاری، اتمام آبیاری و نفوذ کامل آب (ناپدید شدن آب در سطح

خاک) یادداشت شد. مدت پنج ساعت برای نفوذ نهایی و باز توزیع آب در خاک فرصت داده شد. با حفر ترانشه اقدام به ثبت داده‌های مربوط به ابعاد هرم بعد از مراحل بارش و عمق جبهه رطوبتی خاک در همان محل اندازه گیری اولیه گردید.

جدول ۱- مشخصات تیمارهای انجام شده.

ابعاد ساختار (cm)	عمق حفره (cm)	شدت پخش آبیاری ($cm\ h^{-1}$)	زمان آبیاری (min)	زمان نفوذ کامل آب (min)
۵۰×۵۰	۲۰	۱۱/۴۹	۱۰	۶۰
۴۰×۴۰	۱۶	۱۱/۶۶	۱۰	۳۰
۳۰×۳۰	۱۲	۱۳/۷۶	۱۰	۴۵
صاف	-	۱۳/۷۶	۱۰	۴۵

شبیه‌سازی

به منظور انجام شبیه‌سازی فرآیند استحصال آب باران برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب صورت گرفت و در گام‌های زمانی مختلف مشخصات نفوذ در هر نقطه به دست آمد. برای انجام شبیه‌سازی برخی ساده سازی‌های انجام شد از جمله اینکه: الف) نفوذ در کل منطقه سطوح جمع کننده آب در طول مدت بارش یکسان بوده و غرقاب بودن بخشی از زمین و همچنین شیب تأثیری در نرخ نفوذ ندارد. ب) ساختار ایجاد شده هرمی به صورت کاملاً دقیق از نظر هندسی بوده و تخریب و فرسایشی در اثر بارش ایجاد نشده است. ج) گرانش و در نتیجه عمق آب جمع شده در انتهای حفره‌ها تأثیری در نفوذ نداشته و آب به صورت عمود بر سطح نفوذ می‌نمایند. البته برخی از این فرضیات دور از ذهن نیست. چرا که در بارشی که منجر به ایجاد رواناب گردد می‌توان انتظار داشت لایه‌ای از آب روی سطح خاک قرار گیرد و عملاً نفوذ به صورت اشتباه رخ دهد. و اینکه تأثیر عمق آب بر نفوذ در خاک خشک در مقایسه با مکش ماتریک خاک ناچیز است (حدود یک درصد به ازای هر سانتی‌متر عمق آب) (فاکس و همکاران ۱۹۹۷).

برای انجام شبیه سازی یک روش گام به گام مورد استفاده قرار گرفت. مبنای روش استفاده شده بر این اصل استوار است که بخشی از آب باران ورودی، در سطوح شیب‌دار دیواره‌های ساختار جذب می‌شود و اگر نرخ بارش بیش از نرخ نفوذ در واحد سطح افقی خاک باشد، بقیه آب ورودی بر روی سطوح شیب‌دار جاری شده و در ته حفره ها جمع می‌گردد در این حالت با گذشت زمان سطح آب در داخل ساختار بالا خواهد آمد. بعد از اتمام بارش، نفوذ در دیواره‌های شیب‌دار متوقف می‌شود ولی نفوذ از بخش‌هایی که با آب راکد در تماس است همچنان ادامه دارد. با گذشت زمان، به علت نفوذ آب در دیواره‌هایی که با آب راکد در تماس هستند، سطح آب راکد جمع شده در انتهای حفره پایین می‌آید تا زمانی که سطح خاک در انتهای حفره نمایان شود. با استفاده از برخی روابط هندسی نظیر حجم هرم، مساحت جانبی هرم و برخی نسبت‌های ساده از نظر ریاضی، طول زمان تماس هر نقطه از سطح خاک با آب به دست آمد. از طرفی با توجه به فرض انجام شده در بند الف، تنها عاملی که باعث متفاوت بودن میزان آب نفوذ یافته در نقاط مختلف زمین می‌شود، متفاوت بودن طول زمان تماس آن نقاط با آب است. در این روش گام به گام، طول زمان تماس

یافته در هر مقطع افقی از هرم و عمق آب نفوذ یافته در هر نقطه از زمین بود.

در ادامه و برای مشخص شدن اثرات تغییر کمیت‌های ورودی بر روی نحوه توزیع آب در خاک، اقدام شبیه سازی با تغییر در کمیت‌های ورودی شامل شدت بارش، عمق حفره و طول زمان بارندگی برای خاک منطقه و ابعاد مختلف مورد آزمایش، گردید و نتایج با یکدیگر مقایسه شد.

نتایج و بحث

در هر آزمایش ۱۵ حفره (هرم) ایجاد شد به منظور اجتناب از خطا، سه حفره مرکزی در هر آزمایش مورد اندازه گیری قرار گرفت (شکل ۲) تنها عامل متغیر در آزمایش‌ها، ابعاد ساختار بود و بقیه کمیت‌ها نظیر جنس خاک، شیب دیواره، طول زمان بارش و نرخ بارش در تمام آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شد مشخصات آزمایش‌ها در جدول ۱ موجود است. سپس نتایج به دست آمده، میانگین گیری و نرمال سازی شد. عمق نفوذ به صورت عمودی D ، از طریق تفاضل عمق جبهه رطوبتی و سطح خاک پس از پایان آبیاری به دست آمد.

هر نقطه از زمین با آب، مشخص شد و سپس با استفاده از معادله نفوذ SCS، میزان نفوذ آب در هر نقطه و در هر گام زمانی به دست آمد. پس از تکمیل برنامه و با اجرای آن از روی طول زمان لازم برای ناپدید شدن آب در سطح خاک و همچنین جنس خاک اقدام به تعیین شماره منحنی نفوذ مورد استفاده در رابطه SCS که برای شبیه سازی به کار گرفته شده است گردید. با توجه به نتایج، شماره منحنی نفوذ، ۱ اینچ بر ساعت به دست آمد که نرخ نفوذ نهایی برای خاک لومی شنی است و متناسب با نوع خاک مورد آزمایش بود.

برای بررسی صحت شبیه سازی حجم آب نفوذ یافته در هر گام زمانی با همدیگر جمع گردید. این مقدار باید برابر با حجم آب ورودی از طریق بارش باشد و میزان انحراف از این مقدار بیانگر خطا در شبیه سازی است. داده‌های به دست آمده در شبیه سازی شامل حجم آب و عمق آب باقیمانده در انتهای حفره در گام‌های زمانی مختلف پس از اتمام بارندگی، فاصله مکان قرارگیری آب از ابتدای حفره پس از اتمام بارندگی در طول زمان‌های مختلف، طول زمان نفوذ کامل و نمایان شدن سطح زمین در گود ترین محل هرم، حجم آب نفوذ



شکل ۲- نحوه عمل سیستم و روش داده برداری.

سطح زمین به عمق نفوذ عمود بر سطح نفوذ) استفاده شد که برابر است با نصف طول قاعده هرم تقسیم بر طول ارتفاع هر مثلث تشکیل دهنده بدنه هرم (L).

از آنجایی که نفوذ عمود بر سطح نفوذ و نه عمود بر سطح زمین در شبیه سازی مورد نظر بود، از کسینوس زاویه این دو (برای تبدیل عمق نفوذ به صورت عمود بر

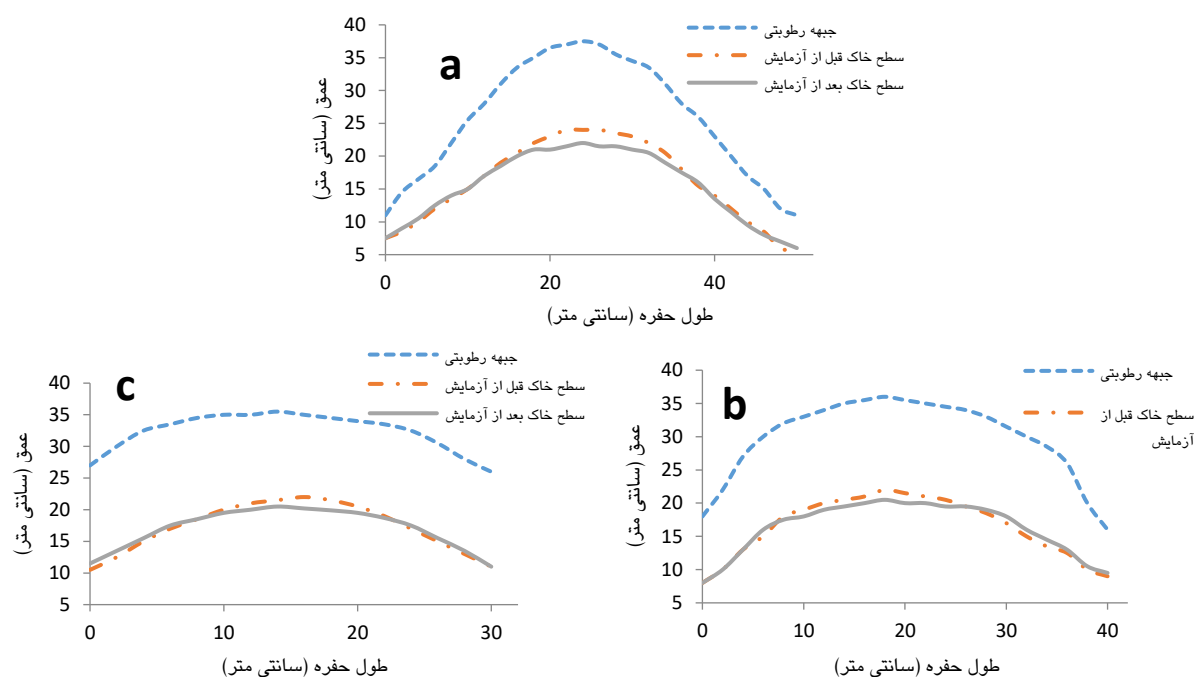
شروع آزمایش با پروفیل متر تعیین شد. نتایج به دست آمده در شکل ۳ دیده می‌شود. در شکل ۳ محور افقی طول حفره و محور عمودی، عمق‌های اندازه‌گیری شده از مبدا سنجش می‌باشد که به صورت معکوس (وارونه) رسم شده است.

$$d = D \times \cos \alpha \quad [6]$$

که در آن

$$\cos \alpha = \frac{A/2}{L} \quad [7]$$

برای انجام اندازه‌گیری‌ها از یک خطکش مدرج استفاده شد که پس از حفر ترانشه در مقابل خاک قرار داده شد و ابعاد ساختار بعد از انجام آزمایش و عمق جبهه نفوذ D اندازه‌گیری شد. ابعاد ساختار قبل از



شکل ۳- نتایج اندازه‌گیری برای ساختارهایی با ابعاد (a) ۵۰×۵۰، (b) ۴۰×۴۰ و (c) ۳۰×۳۰ (سانتی‌مترمربع).

نفوذ یافته در سطح صاف و بدون ساختار کجاوه می‌باشد که از طریق تعدیل برحسب شدت بارش متناسب با هر آزمایش به دست آمده است. از روی شکل ۳ نیز کاملاً مشخص است که در ساختاری با ابعاد بزرگتر و در یک شدت بارش ثابت، توان متمرکز نمودن آب بیشتر را دارد. این نتیجه مربوط به حالتی است که شدت بارش بیش از شدت نفوذ باشد.

نتایج شبیه‌سازی

همانگونه که گفته شد، عمق آب نفوذ یافته در مناطقی که فقط در طول زمان بارش در آنها نفوذ رخ داده

در شکل ۳ فرسایش خاک و تجمع آن در کف حفره، قابل مشاهده است. میزان بالا آمدگی کف حفره‌ها بعد از اعمال بارش و به علت فرسایش، در ابعاد ۵۰×۵۰ و ۴۰×۴۰ و ۳۰×۳۰ سانتی‌مترمربع به ترتیب ۳، ۲/۵ و ۱ سانتی‌متر است. درصد کاهش عمق حفره‌ها، به ترتیب ۱۵٪، ۱۵/۶٪ و ۱۰٪ است که می‌تواند به عنوان معیاری از میزان فرسایش در نظر گرفته شود. شکل ۴ بیانگر میزان عمق نفوذ یافته عمود بر سطح جذب d می‌باشد که از رابطه ۶ حاصل شده است. خط افقی بیانگر عمق آب

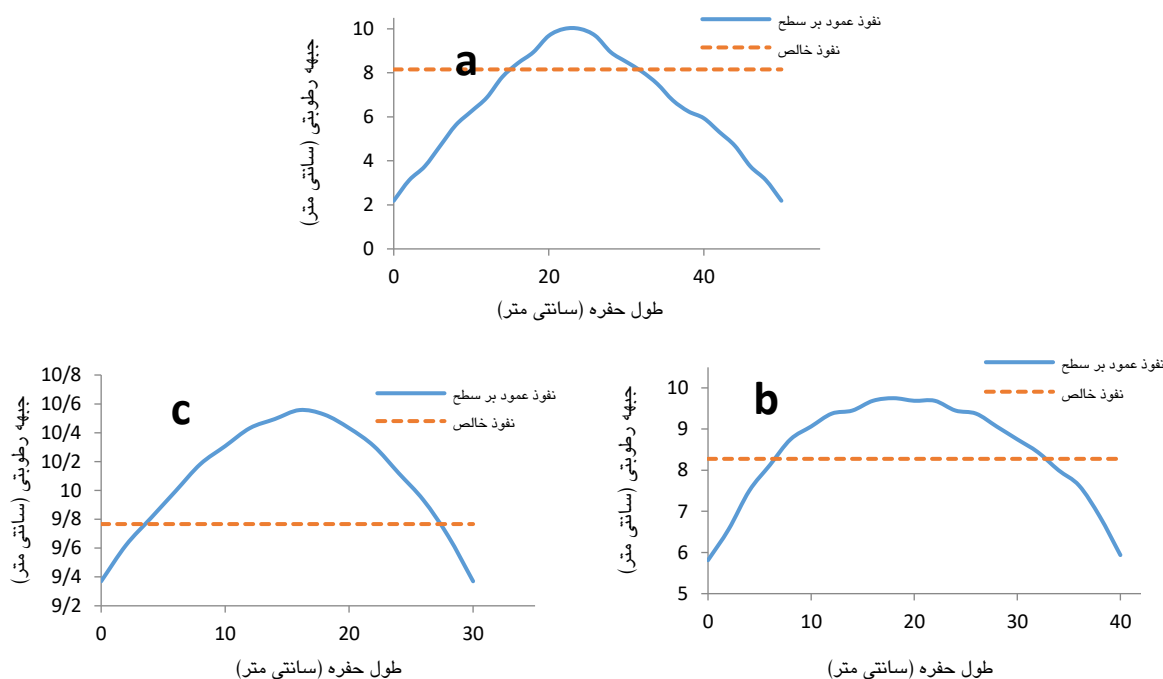
در سطح صاف این دو مساحت یکسان بوده و حاصل نسبت برابر یک است و هر چه مناطقی که بیشترین نفوذ را دارد متمرکز تر باشد a کوچکتر شده و از آنجایی که A مقدار ثابتی است، این نسبت کاهش خواهد یافت. این عدد را در ترکیب با اختلاف کمترین عمق نفوذ (D_{min}) با بیشترین عمق نفوذ (D_{max}) یعنی μ (رابطه ۹) می‌توان معیاری برای مقایسه قرار داد.

$$\mu = D_{max} - D_{min} \quad [9]$$

همچنین حجم آب نفوذ یافته در سطوح جذب، از طریق شبیه‌سازی محاسبه شد که در مقایسه با حجم واقعی ورودی آب، معیاری از تناسب شبیه‌سازی می‌باشد. این کمیت به صورت درصد تغییرات از حجم واقعی (ΔV) بیان گردید.

است برابر و مساوی با مقدار عمق نفوذ تجمعی به دست آمده از معادله SCS برای طول زمان بارندگی یعنی T_i است بنابراین این خطوط صاف در دو طرف شکل‌های ۵ تا ۷ دیده می‌شود. ولی با نزدیک شدن به مرکز حفره به جایی می‌رسیم که بعد از پایان بارندگی آب تا آن مکان بالا آمده است. فاصله آن نقطه تا ابتدای حفره معیاری برای مقایسه حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده است. یعنی نسبت مساحت قاعده هرم که در پایان بارندگی آب در آن جمع می‌شود (a^2) به مساحت قاعده هرم اصل (A^2) که با σ نشان داده می‌شود (رابطه ۸).

$$\sigma = \left(\frac{a}{A}\right)^2 \quad [8]$$



شکل ۴- میزان عمق نفوذ یافته عمود بر سطح جذب d برای ساختارهایی با ابعاد (a) 50×50 ، (b) 40×40 و (c) 30×30 سانتی‌متر مربع).

از میزان متمرکز شدن آب کاسته شده است. سه معیار σ ، μ و ΔV برای ساختارهای با ابعاد 50×50 و 40×40 و 30×30 سانتی‌متر مربع در جدول ۲ موجود است. در سطح صاف $\sigma=1$ و $\mu=0$ است. بزرگ بودن μ و

تأثیر ابعاد قاعده هرم (A) بر مشخصات نفوذ همانگونه که از شکل ۵ دیده می‌شود، مشخص است که با کاهش ابعاد قاعده هرم و با ثابت بودن سایر مشخصات از جمله نسبت ارتفاع هرم به طول قاعده هرم،

همچنین کوچک بودن σ دلیل بر متمرکز بودن منطقه نفوذ آب می‌باشد. در تغذیه آبهای زیرزمینی مقدار بسیار کوچک σ و بسیار بزرگ μ مطلوب است و هدف از شبیه سازی رسیدن به این مقصود است ولی در آبیاری بارانی که هدف کاهش رواناب و افزایش یکنواختی است، $\sigma = 1$

و $\mu = 0$ مطلوب است. برای کشت دیم نیز با توجه به گیاه مورد کشت و نحوه توزیع ریشه و عمق خاک، میزان تمرکز (σ) و اختلاف عمق نفوذ (μ) باید از طریق روش‌های بهینه سازی تعیین شود.

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی برای ابعاد متفاوت ساختار.

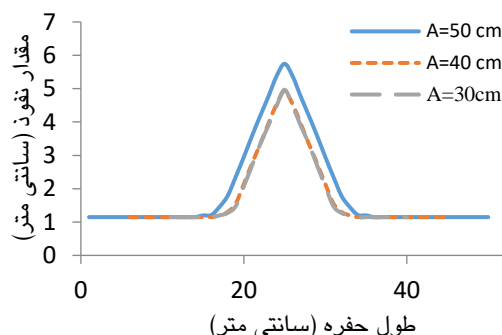
ابعاد ساختار (cm)	$\sigma (cm^2 cm^{-2})$	$\mu (cm)$	درصد تغییرات حجم (ΔV) ($cm^3 cm^{-3}$)
۵۰×۵۰	۰/۱۶	۴/۶۰	-۱۳/۴۳
۴۰×۴۰	۰/۲۰	۳/۷۸	-۱۴/۳۲
۳۰×۳۰	۰/۳۵	۳/۷۲	-۲۱/۱۷

از روی مقادیر σ و μ دیده می‌شود با کوچکتر شدن ابعاد قاعده هرم ساختارها، میزان σ افزایش می‌یابد که بیانگر کاهش تمرکز توزیع آب است. همچنین اختلاف نقاطی با بیشترین عمق و کمترین عمق نفوذ کمتر می‌شود و در عمل ساختار توان خود در تمرکز آب را از دست می‌دهد. این مطلب در شکل ۵ نیز کاملاً قابل مشاهده است. در شکل ۵ علت یکسان بودن نفوذ تجمعی برای ساختارهایی با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌مترمربع و ۴۰×۴۰ سانتی‌مترمربع، زیاد بودن شدت بارش برای ساختار با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌مترمربع نسبت به ساختار با ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی‌مترمربع در زمان آزمایش است، چراکه آزمایش در روزهای مختلف انجام گرفته است و تغییرات در شدت پخش غیر قابل اجتناب است. اگر شدت پخش هر دو یکسان می‌بود، نتایج برای ساختار با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌مترمربع پایین تر از نتایج برای ساختار با ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی‌مترمربع بود همانگونه که در شکل ۶ قابل مشاهده است. انتظار می‌رود با کوچکتر شدن ابعاد ساختارها، به حالت توزیع یکنواخت آب مانند زمین صاف نزدیک شویم. با این حال هنوز مزیت‌هایی نظیر کاهش رواناب سطحی و افزایش یکنواختی توزیع در آبیاری بارانی به قوت خود باقی است. در حین طراحی باید به حجم قابل ذخیره در هر یک از هرم‌های ساختار توجه نمود چرا که اگر حجم آب جمع شده ناشی از بارش

یا آبیاری بیش از حجم قابل ذخیره در ساختارها باشد، دیگر مزیتی برای این ساختارها نمی‌توان متصور شد و همین که منجر به تخریب ساختار می‌شود.

تأثیر شدت بارش (I) بر مشخصات نفوذ

از آنجایی که نتایج قابل استناد و قابل اعتماد در مورد تأثیر شدت بارش بر شدت نفوذ وجود ندارد (موربدلی و همکاران ۲۰۱۶) و به منظور ساده سازی در پیشبرد شبیه‌سازی، میزان نفوذ مستقل از عواملی مانند شدت بارش، نحوه تماس آب با خاک و شیب در نظر گرفته شده است و تنها وابستگی به طول زمان نفوذ در یک نوع خاک مشخص بررسی شده است و با افزایش شدت پخش میزان نفوذ ثابت باقی می‌ماند. با افزایش شدت پخش در هر سه نوع ساختار مذکور، σ و μ افزایش می‌یابد که نتایج در جدول ۳ برای حالت‌های مختلف دیده می‌شود. چنین رفتاری قابل انتظار است چرا که با افزایش شدت بارش و ثابت بودن نرخ نفوذ در حین بارش، حجم آب جمع شده در مرکز ساختار افزایش خواهد یافت و این منجر به نفوذ بیشتر در مرکز ساختار و همچنین بیشتر شدن سطحی که آب اضافی دریافت می‌نماید خواهد شد (شکل ۶).



شکل ۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای ساختارهایی با ابعاد ۳۰×۳۰ و ۴۰×۴۰ و ۵۰×۵۰ سانتی‌مترمربع.

در دسترس در بارندگی‌هایی با شدت بارش بالا می‌باشد. از طرفی با افزایش شدت بارش، توانایی ساختار کجاوه در متمرکز نمودن آب کاهش می‌یابد. این میزان کاهش در ساختارهایی با ابعاد بزرگتر کمتر از ساختارهایی با ابعاد کوچکتر است به طوری که معیار متمرکز نمودن آب (σ) با افزایش شدت بارش از حدود ۱۲ سانتی‌متر در ساعت به ۲۴ سانتی‌متر بر ساعت برای ساختارهای ۵۰×۵۰ و ۴۰×۴۰ و ۳۰×۳۰ سانتی‌مترمربع به ترتیب از $۰/۱۶$ به $۰/۵۲$ ، از $۰/۲$ به $۰/۶۱$ و از $۰/۳۵$ به $۰/۷۶$ افزایش یافت که بیانگر کاهش توان متمرکز نمودن آب توسط ساختار کجاوه برای شدت‌های بارش بالا در ساختارهای با ابعاد کوچکتر است.

شدت بارش جزء کمیت‌های ورودی غیر قابل کنترل در دیم کاری است و با تحلیل آماری به دست می‌آید (گیرکیدان ۲۰۰۳). با افزایش شدت بارش عمق نفوذ یافته اضافی (μ) در هر سه ساختار افزایش یافت. این میزان افزایش در ساختار با ابعاد بزرگتر بیشتر است به طوری که افزایش μ در ساختار ۵۰×۵۰ سانتی‌مترمربع به اندازه $\Delta\mu = 4.85$ سانتی‌متر (معادل $۱/۰۵\%$)، در ساختار ۴۰×۴۰ سانتی‌مترمربع به اندازه $\Delta\mu = 4.04$ سانتی‌متر (معادل $۹/۸\%$) و در ساختار با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌مترمربع و اندازه $\Delta\mu = 2.68$ سانتی‌متر (معادل $۷/۲\%$)، برای افزایش شدت بارش از حدود ۱۲ سانتی‌متر در ساعت به ۲۴ سانتی‌متر بر ساعت می‌باشد (جدول ۳). این امر بیانگر مفید بودن ساختار کجاوه برای افزایش آب

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی برای شدت بارش متفاوت.

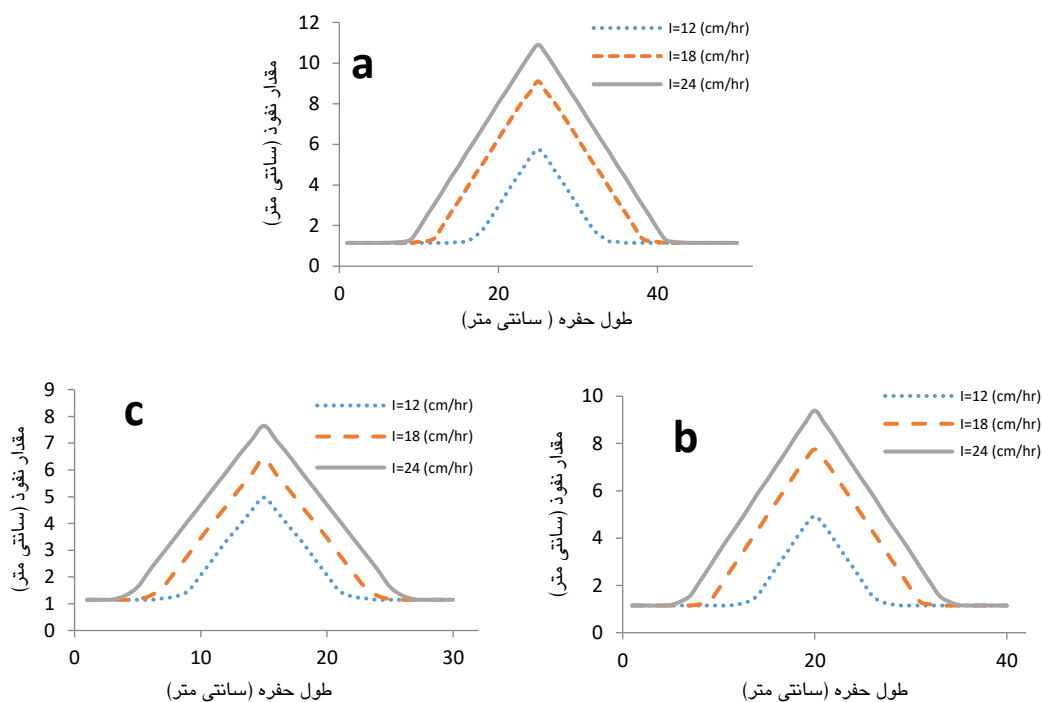
									شدت پخش ($cm h^{-1}$)
۲۴			۱۸			۱۲			ابعاد
ΔV	μ	σ	ΔV	μ	σ	ΔV	μ	σ	
-۱۸/۵۱	۹/۴۵	۰/۵۲	-۱۸/۳۷	۷/۴۳	۰/۳۸	-۱۳/۴۳	۴/۶۰	۰/۱۶	۵۰×۵۰
-۲۱/۴۲	۸/۱۴	۰/۶۱	-۲۰/۳۵	۶/۳۱	۰/۴۴	-۱۴/۳۲	۴/۱	۰/۲۰	۴۰×۴۰
-۲۵/۸۳	۶/۴۰	۰/۷۴	-۲۴/۵۹	۵/۰۸	۰/۵۳	-۲۱/۱۷	۳/۷۲	۰/۳۵	۳۰×۳۰

با کاهش شدت پخش ساختارهای کجاوه قابلیت خود در متمرکز نمودن آب را از دست می‌دهند به طوری که در شدت بارش کمتر از یک میزان آستانه، دیگر آبی در مرکز هرم جمع نخواهد شد و توزیع یکنواخت آب رخ خواهد داد. میزان آستانه کمترین شدت بارش برای ایجاد روان آب به جنس خاک، شیب، پوشش گیاهی و ویژگی‌های سطح خاک نظیر زبری و فشردگی سطح بستگی دارد.

همانگونه که گفته شد یکی از فرضیات اصلی شبیه‌سازی وابستگی میزان نفوذ به طول زمان تماس آب با خاک است. با افزایش طول زمان بارش، طول زمان تماس آب با خاک در منطقه سطوح جمع‌کننده آب افزایش خواهد یافت و به تبع آن میزان نفوذ نیز در این مناطق افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش طول زمان بارش کل، آب ورودی به ساختار (V_r) افزایش می‌یابد. در نتیجه حجم آب جمع شده در مرکز هرم نیز متناسب با افزایش این دو به صورت V_v (روابط ۵ و ۶) تغییر می‌کند.

با مقایسه شدت بارش شبیه‌سازی شده می‌توان مشاهده کرد میزان اختلاف افزایش آب اضافی نفوذ یافته ($\Delta\mu$) با افزایش شدت بارش کوچک‌تر می‌شود به طوری که با افزایش شدت بارش از تقریباً ۱۲ به ۱۸ و از ۱۸ به ۲۴ سانتی‌متر بر ساعت، میزان افزایش μ به ترتیب برابر با $\Delta\mu = 3.82$ و $\Delta\mu = 2.02$ سانتی‌متر (معادل ۸۳٪ و ۲۷٪) برای ساختارهای با ابعاد 50×50 سانتی‌متر مربع و $\Delta\mu = 2.21$ و $\Delta\mu = 1.83$ سانتی‌متر (معادل ۵۴٪ و ۲۹٪) برای ساختار با ابعاد 40×40 سانتی‌متر مربع و $\Delta\mu = 1.36$ و $\Delta\mu = 1.32$ سانتی‌متر (معادل ۳۶٪ و ۲۶٪) برای ساختار با ابعاد 30×30 سانتی‌متر مربع است (جدول ۳). این امر می‌تواند به علت کاهش توان متمرکز نمودن آب (σ) با افزایش شدت پخش باشد چرا که با وارد شدن حجم بیشتر آب در یک زمان مشخص، آب تا ارتفاع بیشتری در داخل حفره بالا می‌آید.

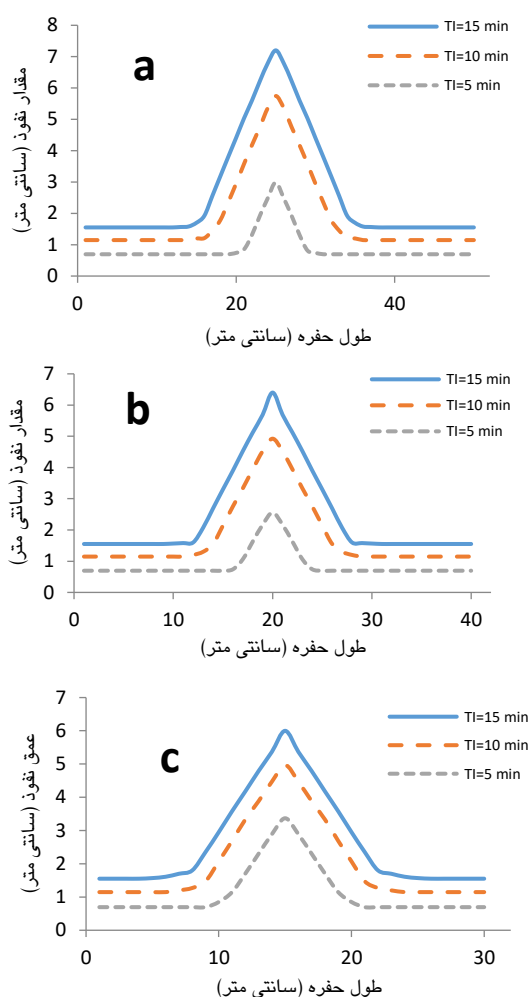
تاثیر مدت بارش بر مشخصات نفوذ



شکل ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای شدت بارش‌های مختلف در ساختارهایی با ابعاد (a) ۵۰×۵۰ ، (b) ۴۰×۴۰ و (c) ۳۰×۳۰ (سانتی‌متر مربع).

ساختار رفتار مشابه داشت است که در جدول ۵ خلاصه شده است. افزایش σ بدلیل افزایش سطح مقطع هرمی که آب اضافی دریافت کرده است، به علت افزایش حجم آب جمع شده در مرکز هرم می‌باشد.

از آنجایی که نرخ بارش بیشتر از نرخ نفوذ می‌باشد، V_p با گذشت زمان افزایش خواهد یافت و این منجر به افزایش σ و μ می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی-های انجام شده تایید کننده این رفتار می‌باشد (شکل ۷). نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای σ و μ برای هر سه



شکل ۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مدت مختلف بارش‌های در ساختارهایی با ابعاد (a) ۵۰×۵۰ ، (b) ۴۰×۴۰ و (c) ۳۰×۳۰ (سانتی‌متر مربع).

سانتی‌متر مربع به ترتیب $۴/۶$ ، $۳/۷۸$ و $۳/۷۲$ سانتی‌متر است که باعث افزایش آب در دسترس گیاه نسبت به حالت بدون ساختار می‌گردد. همچنین کاهش ابعاد ساختار باعث کاهش توان متمرکز نمودن آب توسط

نتایج شبیه‌سازی برای ابعاد مختلف ساختارهای کجاوه بیانگر افزایش عمق نفوذ یافته اضافی μ برای ساختارهایی با ابعاد بزرگتر است به طوری که مقادیر μ برای ساختارهایی با ابعاد ۵۰×۵۰ و ۴۰×۴۰ و ۳۰×۳۰

ساختار می‌گردد به طوری که معیار توان متمرکز نمودن آب (σ) برای ساختارهایی با ابعاد 50×50 و 40×40 و 30×30 سانتی‌مترمربع به ترتیب به $0/16$ ، $0/2$ و $0/35$ رسید (جدول ۲).

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی برای طول بارش متفاوت.

زمان بارش			۱۰			۵			ابعاد
ΔV	μ	σ	ΔV	μ	σ	ΔV	μ	σ	
-۱۷/۶۵	۵/۳۹	۰/۲۶	-۱۳/۴۳	۴/۶۰	۰/۱۶	-۳/۸۷	۲/۱۹	۰/۰۵	50×50
-۲۰/۴۲	۴/۵۷	۰/۳۱	-۱۴/۳۲	۳/۷۸	۰/۲۰	-۵/۱۲	۱/۸۶	۰/۰۶	40×40
-۲۸/۳۰	۴/۱۹	۰/۵۱	-۲۱/۱۷	۳/۷۲	۰/۳۵	-۱۱/۳۶	۲/۵۷	۰/۱۶	30×30

۱۰ دقیقه به ۱۵ دقیقه، می‌توان دید تغییرات در میزان آب اضافی جمع شده برابر $\Delta\mu=2.41$ و $\Delta\mu=0.79$ سانتی‌متر (معادل ۱۱۰٪ و ۱۷٪) برای ساختار با ابعاد 50×50 سانتی‌مترمربع و $\Delta\mu=1.92$ و $\Delta\mu=0.79$ سانتی‌متر (معادل ۱۰۳٪ و ۲۱٪) برای ساختار با ابعاد 40×40 سانتی‌مترمربع و $\Delta\mu=1.15$ و $\Delta\mu=0.47$ سانتی‌متر (معادل ۴۵٪ و ۱۳٪) برای ساختار با ابعاد 30×30 سانتی‌مترمربع است. هر چند این تغییرات مثبت است ولی با افزایش طول زمان بارش، کاهش می‌یابد و می‌توان انتظار داشت با افزایش بیشتر طول زمان بارش، مقدار $\Delta\mu$ به صفر میل کند. این نتیجه با تمایل σ به سمت یک همراه خواهد بود (جدول ۴) و ساختارها توان خود در متمرکز نمودن آب را از دست خواهند داد. با این وجود در چنین حالتی نیز توان ساختارها در جلوگیری از ایجاد رواناب و فرسایش خاک همچنان باقی است.

نتیجه گیری کلی

با مقایسه تصاویر و داده‌های حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی، در ظاهر اختلاف فاحشی بین این دو وجود دارد ولی این نکته را نباید فراموش کرد که در نمودارهای حاصل از نتایج آزمایش، عمق جبهه رطوبتی نشان داده شده است ولی در نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی،

با توجه به جدول ۴، با افزایش مدت طول زمان بارش، عمق نفوذ یافته اضافی ($\Delta\mu$) در هر سه ابعاد ساختار افزایش یافته است. علت آن همانطور که بیان شد، بیشتر بودن شدت بارش از شدت نفوذ است. ساختار کجاوه آب اضافی ناشی از این اختلاف را در مرکز ساختار جمع می‌نماید و μ افزایش می‌یابد. از مقایسه بین ابعاد ساختار و طول زمان بارش‌های مختلف، دیده می‌شود که میزان افزایش μ به علت افزایش طول زمان بارش، در ساختارهای بزرگتر بیشتر از ساختارهای کوچکتر است و اختلاف μ در ساختارهایی با ابعاد 50×50 سانتی‌مترمربع برای دو طول زمان بارش ۵ و ۱۵ دقیقه به اندازه $\Delta\mu=3.2$ سانتی‌متر (معادل ۱۴۶٪) و در ابعاد 30×30 سانتی‌مترمربع برابر $\Delta\mu=1.62$ سانتی‌متر (معادل ۶۳٪) است. علت این امر کاهش توان متمرکز نمودن آب در ساختارهای با ابعاد کوچکتر در بارندگی‌های طولانی مدت است به طوری که معیار متمرکز نمودن (σ) در ساختار 50×50 سانتی‌مترمربع با افزایش طول زمان بارش از ۵ دقیقه به ۱۵ دقیقه، از $0/05$ به $0/26$ رسید ولی در ساختار 30×30 سانتی‌مترمربع با همان مقدار افزایش در طول زمان بارش، از $0/16$ به $0/51$ رسید. با مقایسه افزایش یکسان در طول زمان بارش، یعنی از ۵ دقیقه به ۱۰ دقیقه و از

بارش)، درصد تغییرات از حجم واقعی افزایش یافته است و این بیانگر افزایش خطا در شبیه‌سازی می‌باشد. این خطا می‌تواند به علت در نظر گرفتن فرضیات گفته شده و یا کالیبره نمودن شبیه‌سازی بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها باشد، ولی در حالت کلی نتایج شبیه‌سازی انجام شده با آزمایش‌ها و انتظارات سازگار می‌باشد. درکل می‌توان گفت با کوچکتر شدن ابعاد ساختار (کاهش مقدار A)، توان متمرکز نمودن آب توسط ساختار کمتر می‌گردد. همچنین انتظار می‌رود در بارش با شدت‌های بالا، توان متمرکز نمودن آب توسط ساختار کجاوه کاهش یابد این امر به خصوص در ساختارهایی با ابعاد کوچکتر مشهودتر است. از طرفی در بارندگی‌های طولانی مدت نیز، کاهش توان متمرکز نمودن آب به ویژه در ساختارهایی با ابعاد کوچکتر مورد انتظار است.

عمق آب نفوذ یافته نشان داده شده است. متأسفانه رطوبت خاک در عمق جبهه رطوبتی اندازه‌گیری نشد ولی در حین آزمایش اختلاف بسیاری در میزان رطوبت (از ظرفیت زراعی تا حالت اشباع) در نقاط مختلف قابل مشاهده بود. دلیل دوم می‌تواند به علت فرضیات انجام شده در شبیه‌سازی باشد. عدم تاثیر شیب و نحوه آبیاری بر روی میزان نفوذ و همچنین صرف نظر کردن از توزیع آب در خاک پس از اتمام بارندگی به‌همراه صرف‌نظر از ضخامت خاک در نقاط مختلف، به خصوص در لبه‌های حفره، از جمله فرضیاتی است که به منظور ساده سازی برای شبیه‌سازی اولیه در نظر گرفته شده است. با این وجود روند یکسان تغییرات رطوبت در داده‌های حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی مشهود است. از طرفی در تمام موارد بررسی، با کاهش ابعاد و یا افزایش میزان کمیت‌های مورد بررسی (مدت بارش و شدت

منابع مورد استفاده

- Abdallah NA, Ting Wua L and Mohammed Elamin AV, 2016. Rain infiltration into loess soil under different rain intensities and slope angles. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science* 2 (8):179- 183.
- Boers TM and Ben-Asher J, 1982. A Review of Rainwater Harvesting. *Agriculture Water Management* 5: 145-158.
- Critchley W and Siebert K, 1991. *Water Harvesting. A Manual for the Design and Construction Schemes for Plant Production*. FAO, Rome, Italy.
- Dabiri D, Alipor A, Azad B and Fatahi A, 2016. Site selection of *in-situ* and *ex-situ* methods of rain water harvesting in the arid regions of Iran. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 3 (4): 270- 276.
- Durga Rao KHV, Venkateswara Rao V and Roy PS, 2005. Water resources development and role of remote sensing and Geographical Information System. Pp. 312-327. 12th International Rainwater Catchment Systems Conference, 12 November, New Delhi, India.
- Fox DM, Bryan RB and Price AG, 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for inter-rill conditions. *Geoderma* 80: 181 – 194.
- Gebrekidan H, 2003. Grain Yield response of sorghum (*Sorghum bicolor*) to tied ridges and planting methods on Entisols and Vertisols of Alemaya area, Eastern Ethiopian highlands. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics* 104 (2): 113-128.
- Masila T, Udoto MO and Obara J, 2015. Influence of rain water harvesting technologies on household food security among small-scale farmers in Kyuso Sub-County, Kitui County, Kenya. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science* 8 (2): 80-86.
- Mati BM, 2006. Overview of water and soil nutrient management under smallholder rainfed agriculture in East Africa, Colombo, Sri Lanka. *International Water Management Institute (IWMI)*, Sri Lanka, Africa.
- Meera V and Ahammed MM, 2006. Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: a review. *Water Supply Resources and Technology, AQUA* 55: 257– 268.

- Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, Cifrodelli M, Picciafuoco T, Corradini C and Govindaraju RS, 2016. Laboratory investigation on the role of slope on infiltration over grassy soils. *Hydrology* 543: 542–547.
- Nolde E, 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination* 215(1):1-11.
- Oweis T, Prinz D and Hachuma A, 2001. Water Harvesting: Indigenous Knowledge for the Future of the Drier Environments. International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Aleppo, Syria. 22:40–72.
- Prinz D, 2001. Water harvesting for afforestation in dry areas. Pp. 195–198. Proceedings, 10th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Mannheim: 10-14 Sept. Mannheim. Germany.
- Vohland K and Barry B, 2009. A review of *in situ* rainwater harvesting (RWH) practices modifying landscape functions in African drylands. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 131: 119–127.
- Worm J and Hattum T, 2006. Rainwater Harvesting for Domestic Use. Agromisa Foundation and CTA, Wageningen. *Agrodok* 43: 85– 102.