

# شبیه‌سازی فرایند نفوذ سموم شیمیایی در خاک به کمک اتوماتای یادگیر سلولی

سمیرا نوفرستی      محمدرضا میبدی

آزمایشگاه محاسبات نرم

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران ایران

## چکیده

در دهه‌های اخیر استفاده از سموم شیمیایی برای محافظت محصولات کشاورزی فراگیر شده است. آزاد شدن سموم در محیط خطرات زیانباری برای محیط و سلامت انسانها دارد. از جمله عواقب استفاده از سموم شیمیایی آلودگی آبهای زیرزمینی است که در بسیاری از شهرها منبع اصلی آب آشامیدنی را تشکیل می‌دهد. به همین دلیل لازم است قبل از استفاده از سموم اثر آن بر محیط مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله مدلی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه سازی اثرات سموم در خاک پیشنهاد میگردد. با استفاده از این مدل می‌توان اثر عوامل مختلف موثر در نفوذ سموم در خاک قبل از اینکه مبادرت به استفاده از آنها نمود مورد بررسی قرار داد. آزمایشهای انجام گرفته نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده با استفاده از این مدل با واقعیت تطبیق دارند.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، نفوذ سموم شیمیایی در خاک، اتوماتای یادگیر سلولی

## ۱- مقدمه

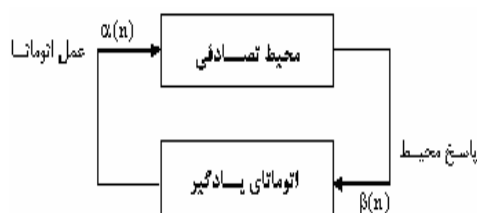
بنابراین لازم است قبل از استفاده از سموم اثر آن بر محیط بررسی و راهکارهای بهتری برای حفاظت از آبهای زیرزمینی فراهم نمود.

مدلسازی فرایند انتقال آلودگی ناشی از سموم و محافظت محیط در مقابل آن مسائل پیچیده‌ای هستند. مشکلات اصلی این مسئله عبارتند از: عدم وجود یک فرمول ریاضی دقیق برای توصیف تعامل فیزیکی و شیمیایی ذرات آلوده با آب، عدم وجود اطلاعات کافی در زمینه تعامل ذرات و عدم اعتبار داده‌های اولیه موجود. مدل‌های مختلفی مبتنی بر مشتقات جزئی برای محاسبه مقدار سم موجود در آبهای زیرزمینی به کار رفته است. مشکل عمده این مدل‌ها پیچیدگی معادلات مورد استفاده و داده‌های مورد نیاز برای حل مسئله است. این مدل‌ها نیاز به داده‌های دقیق و کافی دارند. در حالیکه داده‌های موجود مربوط به مکان خاص (نوع خاصی از خاک و محصولات کشاورزی) و دارای درجه‌های متفاوتی از کیفیت هستند. به علاوه جمع‌آوری این داده‌ها بسیار دشوار است. برای ارزیابی نفوذ سموم به آبهای زیرزمینی از مدل‌های ریاضی یک بعدی نیز استفاده شده است. از آنجا که این مدل‌ها شدیداً تحت تأثیر اطلاعات مربوط به خواص خاک، آب و هوا و نحوه کشاورزی هستند، تعداد زیادی جدول برای انعکاس همه ترکیبات ممکن در جهان نیاز است. برای کاهش تعداد این جدول‌ها به صورتی که قابل مدیریت باشند، از روش ایجاد سناریوهای آب و هوا-خاک استفاده می‌شود. برای این منظور نمونه

در کشاورزی مدرن سموم عناصر ضروری هستند و برای کنترل آفت‌ها به کار می‌روند. سالانه بیشتر از ۲ میلیون تن سم که از ۷۰۰ عنصر فعال مشتق می‌شوند، در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده بی‌رویه از سموم برای محیط، ارگانهای غیر هدف و حتی سلامتی انسانها زیان‌آور است. این سموم که توسط کشاورزان، موسسات مختلف و حتی عامه مردم مصرف می‌شوند، منبع عظیمی از سم را در محیط فراهم می‌کنند. سمومی که به صورت اسپری مصرف می‌شوند، در هوا منتشر شده و از آنجا می‌توانند جذب آب یا خاک شوند. سمومی که مستقیماً روی خاک ریخته می‌شوند نیز ممکن است توسط آبهای سطحی شسته شده یا به داخل خاک نفوذ کنند و از آنجا وارد آبهای زیرزمینی شوند. بعد از این که محصولات کشاورزی سمپاشی می‌شوند سموم جذب خاک شده و بسته به ترکیبات آنها ممکن است تا مدت‌ها در سطح خاک باقی بمانند. سپس وقتی آب به دلیل بارش باران یا جاری شدن سیل در خاک نفوذ می‌کند، این سموم را در خود حل کرده و به لایه‌های زیرین خاک می‌برد. آب حاوی سم ممکن است به تدریج به آبهای زیرزمینی برسد. آبهای زیرزمینی منبع اصلی آبهای تازه هستند. در بسیاری از شهرهای بیش از ۹۰ درصد آب مصرفی شهر از آبهای زیرزمینی تامین می‌شود.

آورده است. این قوانین می‌توانند به صورت قطعی و یا احتمالی بیان شوند. برای اطلاعات بیشتر در باره CA و کاربردهای آن میتوان به [۹] مراجعه نمود.

**اتوماتاهای یادگیر<sup>۴</sup>:** یک اتوماتای یادگیر یک ماشین با حالات محدود<sup>۵</sup> است که میتواند تعداد محدودی عمل را انجام دهد. هر عمل انتخاب شده توسط محیطی احتمالی ارزیابی می‌گردد و پاسخی به اتوماتای یادگیر داده می‌شود. اتوماتای یادگیر از این پاسخ استفاده نموده و عمل بعدی خود را انتخاب می‌کند. در طی این فرایند، اتوماتای یادگیر یاد می‌گیرد که چگونه بهترین عمل را از بی‌ن اعمال مجاز خود انتخاب نماید. ارتباط بین اتوماتای یادگیر و محیط را نشان می‌دهد. محیط را می‌توان توسط سه تایی  $E \equiv \{\alpha, \beta, c\}$  نشان داد که در آن  $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$  مجموعه ورودیها،  $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$  مجموعه خروجیها و  $c = \{c_1, \dots, c_r\}$  مجموعه احتمالاتی جریمه می‌باشد. هرگاه  $\beta$  مجموعه دو عضوی باشد محیط از نوع P می‌باشد. در چنین محیطی  $\beta_1 = 1$  به عنوان جریمه و  $\beta_2 = 0$  به عنوان پاداش در نظر گرفته می‌شود. در محیط Q،  $\beta(n)$  می‌تواند به طور گسسته یک مقدار از مقادیر محدود در فاصله  $[0, 1]$  و در محیط از نوع S،  $\beta(n)$  هر مقدار در فاصله  $[0, 1]$  را اختیار کند.  $c_i$  احتمال اینکه عمل  $\alpha_i$  نتیجه نا مطلوب داشته باشد، می‌باشد. در محیط ایستا مقادیر  $c_i$  در طی زمان بدون تغییر می‌مانند، حال آنکه در محیط غیر ایستا این مقادیر در طی زمان تغییر می‌کنند. اتوماتای یادگیر به دو گروه اتوماتاهای یادگیر با ساختار ثابت و اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر تقسیم می‌شوند. در این مقاله از اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر استفاده شده است که در ادامه این بخش توضیح داده میشود.



شکل ۱: ارتباط بین اتوماتای یادگیر و محیط

**اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر<sup>۶</sup>:** اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر توسط ۴ تایی  $\{\alpha, \beta, p, T\}$  نشان داده می‌شود که در آن  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$  مجموعه عملهای اتوماتا،  $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$  مجموعه ورودیهای اتوماتا،  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  بردار احتمال انتخاب هریک از عملها و  $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$  الگوریتم یادگیری می‌باشد. در این نوع از اتوماتاهای یادگیر، اگر عمل  $\alpha_i$  در مرحله  $m$ م انجام شود و پاسخ مطلوب از محیط دریافت نماید، احتمال  $p_i(n)$  کاهش

خاک، سم و شرایط جوی به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. کار با مدل‌های ریاضی به دلیل نیاز به داده‌های فراوان دشوار است. بندینی<sup>۱</sup> و پاوسی<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی نفوذ سموم شیمیایی در خاک مدل ساده‌ای با استفاده از اتوماتای سلولی ارائه کردند [۱]. این مدل در مقایسه با مدل‌های تحلیلی یک مدل کمی است. این مدل بجای انجام آزمایشات واقعی از طریق شبیه‌سازی تاثیر عواملی مانند نوع خاک، شرایط جوی را در میزان نفوذ سم به آبهای زیرزمینی را بررسی میکند. در این مدل حرکت آب در خاک به دلیل جاذبه زمین صورت می‌گیرد. حرکت افقی آب نیز به صورت تصادفی انجام می‌شود.

در این مقاله مدلی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه‌سازی نفوذ سموم شیمیایی در خاک پیشنهاد میگردد. نشان داده میشود که مدل اتوماتای یادگیر سلولی مدل مناسبتری برای این شبیه سازی میباشد و میتوان شبیه سازیهای که به واقعیت نزدیکتر میباشد انجام داد. در واقع از اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه‌سازی واقعی‌تر حرکت آب در خاک استفاده می‌شود. در مدل پیشنهادی دیگر عوامل موثر در حرکت آب از قبیل خاصیت موئینگی و خاصیت پیوستگی مولکولها را نیز منظور شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این مدل کارایی آن را نشان میدهد. ادامه مقاله به این صورت سازماندهی شده است: در بخش ۲ بطور اختصار اتوماتای سلولی، اتوماتای یادگیر و اتوماتای یادگیر سلولی ارایه میشود و در بخش ۳ شبیه‌سازی نفوذ سموم در خاک که مبتنی بر مدل اتوماتای سلولی میباشد شرح داده میشود. در بخش ۴ روشی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی مورد ارزیابی قرار میگیرد. بخش پایانی مقاله نتیجه گیری میباشد.

## ۲- اتوماتای سلولی، اتوماتای یادگیر و اتوماتای یادگیر سلولی

**اتوماتای سلولی<sup>۳</sup>:** اتوماتای سلولی (CA) یک مدل ریاضی برای سیستم‌هایی است که در آنها چندین مؤلفه ساده برای تولید الگوهای پیچیده با هم همکاری می‌کنند. اتوماتاهای سلولی در حقیقت سیستم‌های دینامیکی گسسته‌ای هستند که رفتارشان کاملاً بر اساس ارتباط محلی استوار است. در اتوماتای سلولی یک مجموعه منظم از سلول‌ها وجود دارد که هر کدام می‌توانند با چند وضعیت مختلف مقداردهی شوند. با توجه به تعداد مقادیری که سلولها می‌توانند اختیار کنند، اتوماتای سلولی به دو نوع دودویی و چندمقداره تقسیم می‌شود. برای هر سلول یک همسایگی از سلولها در نظر گرفته می‌شود. معمولاً همسایگی استفاده شده از نوع همسایگی نزدیک می‌باشد. این سلول‌ها در زمانهای گسسته بر طبق یک قانون محلی بهنگام‌رسانی می‌شوند. در تعیین وضعیت جدید برای هر سلول، مقادیر سلول‌های همسایه نیز تأثیرگذار هستند. انتخاب قوانین مختلف برای بهنگام‌رسانی، انواع متفاوتی از اتوماتای‌های سلولی را بوجود

یافته و سایر احتمالات افزایش می‌یابند. در هر حال، تغییرات به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا حاصل جمع  $p_i(n)$  ها همواره ثابت و مساوی یک باقی بماند. الگوریتم زیر یک نمونه از الگوریتم های یادگیر خطی است.

الف- پاسخ مطلوب

$$p_i(n+1) = p_i(n) + a[1 - p_i(n)]$$

$$p_j(n+1) = (1-a)p_j(n) \quad \forall j \quad j \neq i$$

ب- پاسخ نامطلوب

$$p_i(n+1) = (1-b)p_i(n)$$

$$p_j(n+1) = \frac{b}{r-1} + (1-b)p_j(n) \quad \forall j \quad j \neq i$$

در روابط فوق،  $a$  پارامتر پاداش و  $b$  پارامتر جریمه است. با توجه به مقادیر  $a$  و  $b$  سه حالت را می‌توان در نظر گرفت. زمانی که  $a$  و  $b$  با هم برابر باشند، الگوریتم را  $LRP^y$ ، زمانی که  $b$  از  $a$  خیلی کوچکتر باشد، الگوریتم را  $LRP^a$  و زمانی که  $b$  مساوی صفر باشد، الگوریتم را  $LRP^0$  می‌نامیم. برای اطلاعات بیشتر در باره اتوماتاهای یادگیر و کاربردهای آن میتوان به [۲۹-۲۵] مراجعه نمود.

**اتوماتای یادگیر سلولی<sup>۱۰</sup>:** اتوماتای یادگیر سلولی،  $CLA$ ، مدلی برای سیستم‌هایی است که از اجزاء ساده‌ای تشکیل شده‌اند و رفتار هر جزء بر اساس رفتار همسایگانش و نیز تجربیات گذشته‌اش تعیین و اصلاح می‌شود. اجزاء ساده تشکیل دهنده این مدل، از طریق تعامل با یکدیگر می‌توانند رفتار پیچیده‌ای از خود نشان دهند. هر اتوماتای یادگیر سلولی، از یک اتوماتای سلولی تشکیل شده است که هر سلول آن به یک یا بیشتر اتوماتای یادگیر مجهز می‌باشد که وضعیت این سلول را مشخص می‌سازند. همانند اتوماتای سلولی، قانون محلی در محیط حاکم است و این قانون تعیین می‌کند که آیا عمل انتخاب شده توسط یک اتوماتا در یک سلول بایستی پاداش داده شود و یا جریمه شود. عمل دادن پاداش و یا جریمه منجر به بروز درآوردن ساختار اتوماتای یادگیر سلولی به منظور نیل به یک هدف مشخص می‌گردد. در اتوماتای یادگیر سلولی می‌توان از ساختارهای مختلفی برای همسایگی استفاده نمود. در حالت کلی هر چندتایی مرتب از سلولها را می‌توان به عنوان همسایه در نظر گرفت. عملکرد اتوماتای یادگیر سلولی به این صورت است که در هر لحظه هر اتوماتای یادگیر در اتوماتای یادگیر سلولی یک عمل از مجموعه اعمال خود را انتخاب می‌کند. عمل انتخاب شده با توجه به اعمال انتخاب شده توسط سلولهای همسایه و قانون حاکم بر اتوماتای یادگیر سلولی پاداش داده و یا جریمه می‌شود. با توجه به اینکه عمل انتخاب شده پاداش گرفته و یا جریمه شده است، اتوماتای یادگیر ساختار داخلی خود را بروز میکند و از این طریق اتوماتای یادگیر سلولی رفتار خود را تصحیح مینماید. بعد از بروز شدن ساختار داخلی، هر اتوماتای یادگیر در اتوماتای یادگیر سلولی دوباره یک عمل از

مجموعه اعمال خود را انتخاب کرده و انجام می‌دهد. فرآیند انتخاب عمل و دادن پاداش و یا جریمه کردن اعمال انتخابی توسط سلولها تا زمانی که سیستم به وضعیت پایدار برسد و یا یک معیار از قبل تعریف شده‌ای برقرار شود، ادامه می‌یابد. عمل بهنگام‌سازی ساختار اتوماتاهای یادگیر موجود در اتوماتای یادگیر سلولی توسط الگوریتم یادگیری انجام می‌شود. برای اطلاعات بیشتر در باره اتوماتاهای یادگیر سلولی و کاربردهای آن میتوان به [۲۴-۱۰] مراجعه نمود.

### ۳- شبیه‌سازی فرایند نفوذ سموم در خاک به کمک اتوماتای سلولی

در این بخش مدل بندینی<sup>۱۱</sup> و پاوسی<sup>۱۲</sup> برای شبیه‌سازی نفوذ سموم شیمیایی در خاک که مبتنی بر اتوماتای سلولی میباشد ارائه میگردد [۱]. این مدل در مقایسه با مدل‌های تحلیلی یک مدل کمی است. با استفاده از این میتوان مدل بجای انجام آزمایشات واقعی، از طریق شبیه سازی تاثیر عواملی مانند نوع خاک، شرایط جوی را در میزان نفوذ سموم به آبهای زیرزمینی را بررسی کرد. در این مدل حرکت آب در خاک به دلیل جاذبه زمین صورت می‌گیرد. حرکت افقی آب نیز به صورت تصادفی انجام می‌شود.

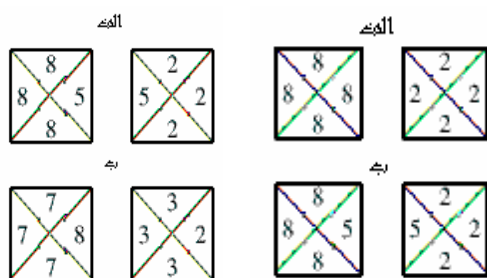
در این روش نفوذ سموم در خاک با یک اتوماتای دو بعدی مدل شده است. سلولها در اتوماتای سلولی در یک شبکه دو بعدی طبق همسایگی فون‌نیومن چیده شده‌اند. در همسایگی فون‌نیومن هر سلول با ۴ سلول دیگر همسایه است که عبارتند از سلول شمالی، جنوبی، شرقی و غربی (شکل ۲). حالت هر سلول نوع عنصر تشکیل دهنده آن سلول را نشان می‌دهد که می‌تواند آب، خاک یا خالی باشد. به علاوه هر سلول آب یا خاک می‌تواند حاوی مقداری سم باشد که با یک عدد صحیح مشخص می‌شود. به علاوه هر سلول مطابق شکل ۳ به ۴ بخش تقسیم می‌شود. مقدار سم موجود در سلول به طور مساوی در این ۴ بخش توزیع شده است. سلولهای اتوماتای سولی در یک شبکه دو بعدی  $m \times n$  قرار دارند و بنابراین همسایه‌های سلول  $c(i,j)$  با  $c(i-1,j)$ ,  $c(i+1,j)$ ,  $c(i,j+1)$  و  $c(i,j-1)$  مشخص می‌شوند. حالت سلول  $c(i,j)$  یک ۵ تایی به صورت  $c(i,j) = \langle I, N, S, W, E, F \rangle$  تعریف میشود که  $I$  شناسه سلول است که می‌تواند آب، خاک یا خالی باشد،  $E, S, N$  و  $W$  چهار متغیر هستند که تعداد ذرات سم در هر بخش سلول را مشخص می‌کنند و  $F = \langle u, d, l, r \rangle$  یک چهارتایی با متغیرهای یک بیتی است. در ابتدای شبیه سازی سلولها مقدار دهی اولیه میشوند که تعیین حالت هر سلول و مقدار سم در هر سلول خاک(یعنی سلولهای خاکی که حداقل یک همسایه خالی دارند)میباشد. سپس آب به بستر خاک اضافه میشود که این بستگی به شرایط جوی دارد که در ادامه مقاله بررسی می‌شود.

این عمل تضمین می‌کند که بعد از مرحله واکنش مقدار سم هیچیک از سلولها بیشتر از ثابت اشباع نشود.

**موازنه:** این قاعده باعث می‌شود سم به صورت همگن در سلولها پخش شود. اگر سلول  $C(i,j)$  دارای مقدار سم  $E_{i,j}$ ,  $S_{i,j}$ ,  $N_{i,j}$  و  $W_{i,j}$  در بخشهای خود باشد در پایان این مرحله هر

$$\left\lfloor \frac{N_{i,j} + S_{i,j} + E_{i,j} + W_{i,j}}{4} \right\rfloor \text{ بخش سم خواهد داشت. باقی‌مانده}$$

این تقسیم به صورت تصادفی بین بخشها تقسیم می‌شود. شکل ۵ مثالی از این قاعده را نشان می‌دهد.



شکل ۵- قاعده

موازنه [۱]

الف) دو سلول قبل از موازنه  
ب) دو سلول بعد از موازنه

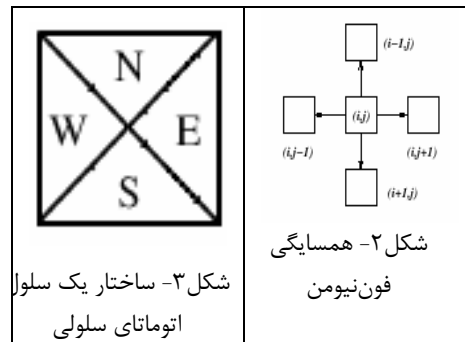
شکل ۴- قاعده واکنش [۱]

الف) دو سلول قبل از واکنش  
ب) دو سلول بعد از واکنش  
اعداد نوشته شده در هر بخش نشان‌دهنده مقدار سم است.

**حرکت:** در این مرحله آب به علت جاذبه زمین در بستر خاک نفوذ می‌کند. البته در حرکت آب عوامل دیگری نیز موثرند. در این مقاله حرکت آب در بستر خاک به این صورت تعریف می‌شود که آب همیشه سعی می‌کند به سمت پایین حرکت کند ولی اگر سلول زیری آن خالی نباشد ممکن است به دو طرف هم حرکت کند. هر گاه آب نتواند به پایین یا دو طرف حرکت کند یک گودال آب تشکیل می‌شود. حرکت آب دارای سه مرحله است. فرض می‌کنیم شناسه سلول  $C(i,j)$  آب باشد.

**مرحله ۱:** در این مرحله هر سلول آب جهت حرکت خود را به صورت زیر انتخاب می‌کند.

- اگر  $I_{i+1,j} = \text{empty}$  باشد  $d_{i,j} = 1$ . یعنی اگر همسایه جنوبی خالی باشد آب سعی می‌کند به سمت پایین حرکت کند. یعنی اولویت با حرکت به سمت پایین است.
- اگر دقیقاً یکی از همسایه‌های دو طرف آن خالی باشد فلگ متناظر  $(l_{i,j}, r_{i,j})$  ست می‌شود.



**قوانین بروزرسانی:** این قوانین به سه نوع تقسیم می‌شوند که به ترتیب در هر مرحله بروزرسانی اعمال می‌شوند. این سه نوع قوانین عبارتند از: واکنش، موازنه و انتشار که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.

**واکنش:** زمانیکه این قانون توسط یک سلول اجرا می‌شود برای آن سلول مقدار سم موجود در هر بخش با مقدار سم موجود در بخش متناظر در سلولهای همسایه موازنه می‌شود. به عنوان مثال اگر  $C(i,j)$  شامل  $p = N_{i,j}$  مقدار سم در بخش شمالی خود و همسایه شمالی‌اش  $C(i-1,j)$  شامل  $q = S_{i-1,j}$  مقدار سم در بخش جنوبی خود باشد، در

پایان واکنش هر بخش دارای  $\left\lfloor \frac{p+q}{2} \right\rfloor$  سم خواهند بود. باقی‌مانده این

تقسیم نیز به صورت تصادفی بین دو بخش تقسیم می‌شود (شکل ۴). این قانون بیانگر قانون موازنه در شیمی است. این قاعده به طور همزمان بر روی همه بخشهای همه سلولهای اتوماتای یادگیر سلولی اعمال می‌شود. البته قانون هنگامی انجام‌پذیر است که دو سلول مجاور هر دو آب یا یکی آب و دیگری خاک باشد. دو سلول خاک مجاور نمی‌توانند در موازنه شرکت کنند. به همین دلیل است که سم تنها در سلولهای سطح خاک قرار دارد. بر روی سلولهای خالی نیز به دلیل این که نمی‌توانند حاوی سم باشند، این قانون اعمال نمیشود. یکی از پارامترهای این قانون ثابت اشباع می‌باشد که نشان‌دهنده ماکزیمم مقدار سمی است که می‌تواند در یک سلول آب یا خاک قرار گیرد. هرچه ثابت اشباع آب بیشتر باشد مقدار سم بیشتری می‌تواند در آن حل شود. این پارامتر بر حسب خواص شیمیایی سم و خاک تعیین می‌شود و به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته می‌شوند. افزودن این پارامتر قاعده واکنش را تا حدی تغییر می‌دهد. به این صورت که اگر  $SC_{i,j}$  ثابت اشباع بخش  $E_{i,j}$  سلول  $C(i,j)$  و  $SC_{i,j+1}$  ثابت اشباع بخش  $W_{i,j}$  سلول  $C(i,j+1)$  و  $p$  و  $q$  مقدار سم این دو بخش باشد قاعده واکنش به صورت زیر در می‌آید:

$$\text{اگر } \left\lfloor \frac{p+q}{2} \right\rfloor > SC_{i,j} \text{ در این صورت تعداد ذرات هر}$$

بخش بعد از واکنش به صورت زیر تغییر میکند

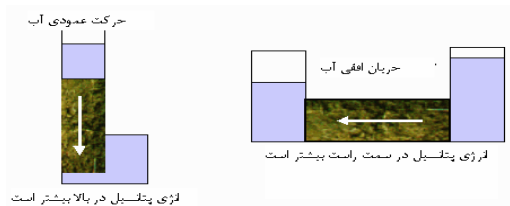
$$W_{i,j+1} = (p+q) - SC_{i,j} \text{ و } E_{i,j} = SC_{i,j}$$

اتوماتای سلولی که شناسه آنها آب میباشند به سلول خالی تبدیل شود. بدین طریق مقدار سمی که بستر را ترک می‌کند و بعداً به آبهای زیرزمینی وارد می‌شود محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی می‌تواند تا خالی شدن بستر از آب بعد از آخرین افزودن آب ادامه پیدا کند.

#### ۴- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی از اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه سازی حرکت آب استفاده می‌شود. در این بخش ابتدا شبیه سازی حرکت آب توسط اتوماتای یادگیر سلولی که شبیه سازی دقیقتری از حرکت آب در خاک میباشد ارائه و سپس مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی نفوذ سموم شیمیایی در خاک شرح داد می‌شود.

شبیه سازی حرکت آب توسط اتوماتای یادگیر سلولی: آب مانند هر شیء دیگری تمایل دارد از مکان دارای انرژی پتانسیل بیشتر به مکان دارای انرژی پتانسیل کمتر حرکت کند. به شکل ۶ توجه کنید. دو عامل در اختلاف پتانسیل دو مکان حاوی آب مؤثرند [۳،۲]: جاذبه زمین و خاصیت موئینگی<sup>۱۳</sup> که خاصیت موئینگی خود از دو نیروی چسبندگی بین آب و ذرات خاک<sup>۱۴</sup> و نیروی پیوستگی بین مولکولهای آب<sup>۱۵</sup> حاصل می‌شود. نیروی جاذبه و خاصیت موئینگی همزمان با هم بر حرکت آب مؤثرند. خاصیت موئینگی موجب حرکت آب در هر جهتی می‌شود ولی نیروی جاذبه آب را به سمت پایین می‌کشاند. هنگامی که خاک اشباع شد و دیگر تمایلی به جذب آب نداشت، نیروی جاذبه تنها نیروی مؤثر در حرکت آب است. در واقع این قواعد به ما اجازه می‌دهند که مشخص کنیم آیا آب قادر به حرکت است و در صورت حرکت به کدام جهت حرکت می‌کند.



شکل ۶- حرکت آب به دلیل اختلاف انرژی پتانسیل [۲]

برای شبیه‌سازی حرکت آب از یک از یک اتوماتای یادگیر سلولی استفاده شده است که هر سلول آب در آن مجهز به یک اتوماتای یادگیر میباشد. یک شبکه از سلولها داریم که هر کدام از سلولها می‌توانند نماینده آب، خاک و یا سلول خالی باشند و هر سلول آب در این شبکه مجهز به یک اتوماتای یادگیر میباشد. همانطور که در بخش قبل اشاره شد هر سلول آب یا خاک از ۴ بخش تشکیل شده و هر بخش می‌تواند حاوی مقداری سم باشد و همچنین نفوذ سموم شیمیایی در خاک شامل سه مرحله واکنش، موازنه و انتشار می‌باشد. دو مرحله واکنش و موازنه

- اگر هر دو همسایه کناری خالی باشند یکی به تصادف انتخاب و فلگ متناظر آن ست می‌شود.
- در غیر این صورت آب نمی‌تواند حرکت کند و فلگی ست نمی‌شود.
- **مرحله ۲:** در این مرحله هر سلول خالی از بین سلولهای آبی که قصد دارند به این سلول حرکت کنند یکی را انتخاب می‌کند. اگر  $c(i,j)$  یک سلول خالی باشد این انتخاب به صورت زیر انجام می‌گیرد:
- اگر  $d_{i-1,j}=1$  باشد  $u_{i,j}=1$ . یعنی اولویت برای سلول آبی است که قصد دارد به سمت پایین بیاید.
- اگر تنها یکی از همسایه‌های کناری فلگ حرکت خود را ست کرده باشد، برنده است و فلگ متناظر  $(l_{i,j}, r_{i,j})$  ست می‌شود.
- اگر هر دو همسایه کناری قصد حرکت به این سلول را داشته باشند به تصادف یکی از آنها انتخاب شده و فلگ متناظر با آن ست می‌شود.
- در صورتیکه که هیچ همسایه‌ای قصد حرکت به این سلول را ندارد فلگی ست نمی‌شود.
- **مرحله ۳-** حرکت واقعی آب در این مرحله صورت می‌گیرد. اگر  $c(i,j)$  سلول آبی باشد که قصد حرکت دارد:
- اگر  $d_{i,j}=1$  و  $u_{i+1,j}=1$  آنگاه  $c(i+1,j) = c(i,j)$  و همه پارامترهای  $c(i,j)$  صفر می‌شوند.
- اگر  $l_{i,j}=1$  و  $r_{i,j-1}=1$  آنگاه  $c(i,j-1)=c(i,j)$  و همه پارامترهای  $c(i,j)$  صفر می‌شوند.
- اگر  $r_{i,j}=1$  و  $l_{i,j+1}=1$  آنگاه  $c(i,j+1)=c(i,j)$  و همه پارامترهای  $c(i,j)$  صفر می‌شوند.
- در غیر این صورت سلول آبی به این سلول وارد نمی‌شود.
- **شبیه‌سازی:** شبیه‌سازی با تخصیص بعضی از سلولهای اتوماتا به خاک و نسبت دادن مقدار مشخصی سم به سلولهای خاک سطحی آغاز می‌شود. سپس آب اضافه می‌شود یعنی بعضی از سلولهای از نوع خالی به نوع آب تغییر پیدا میکنند. افزودن آب وابسته به شرایط جوی است که ممکن است یکی از موارد زیر باشد.
- باران شدید: شناسه کلیه سلولهای خالی ردیف اول اتوماتای سلولی در هر مرحله به‌هنگام‌سازی اتوماتای سلولی را آب قرار می‌دهیم.
- باران معمولی: انجام عمل فوق هر  $k$  مرحله یا به صورت تصادفی با احتمال  $p$  در هر مرحله
- سیل: شناسه کلیه سلولهای خالی اتوماتای سلولی را در ابتدا برابر آب قرار می‌دهیم و بعد در هر مرحله به‌هنگام‌سازی یکی از دو قاعده ۵- فوق می‌تواند اعمال شود.
- سلولهای آب در ابتدا حاوی سم نیستند. به آب اجازه داده می‌شود که بستر خاک را ترک کند. به این صورت که سلولهای ردیف انتهایی

دقیقاً مانند مدل اتوماتای سلولی انجام می‌شوند و مرحله انتشار به کمک اتوماتای یادگیر انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر سلولهای خالی و خاک مانند قبل عمل می‌کنند ولی هر سلول آب دارای یک اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر از نوع LRP میباشد که با استفاده از آن در باره حرکت آب تصمیم گیری میشود. حرکت آب می‌تواند در سه جهت چپ، راست و یا پایین انجام شود. اگرچه خاصیت موئینگی می‌تواند آب را به سمت بالا جذب کند ولی بدلیل اینکه جاری شدن آب در زمان بارندگی یا سیل را بررسی می‌کنیم، یک فشار خارجی بر مولکولهای آب اعمال می‌شود که مانع حرکت آنها به سمت بالا می‌شود. بنابراین اتوماتای یادگیر هر سلول آب دارای سه عمل left ، down و right میباشد.

تعیین احتمال متناظر با هر عمل نیاز به بررسی دقیقتری دارد. اندازه حفره‌های خاک یکی از عوامل اصلی نحوه حرکت آب در خاک است. حفره‌های بزرگتر آب را سریعتر عبور می‌دهند. علت آن نیز این است که خاصیت موئینگی در حفره‌های کوچک بسیار بیشتر است به طوری که در بعضی از خاکها مانند ماسه‌های نرم بر نیروی جاذبه غلبه می‌کند [۴،۵]. بنابراین بسته به نوع خاک این احتمالات به عنوان ورودی داده می‌شود. در هر مرحله بروزرسانی اتوماتای یادگیر سلول آب یکی از سه عمل left ، down و right را با استفاده از بردار احتمالات اعمال خود انتخاب میکند. عمل انتخاب شده توسط محیط بررسی می‌شود. اگر این عمل باعث حرکت آب از مکان دارای انرژی پتانسیل بیشتر به مکان دارای انرژی پتانسیل کمتر شود پاداش می‌گیرد و در غیر این صورت جریمه می‌شود. به عبارت دیگر مجموعه پاسخهای محیط دوتایی است.  $\beta=1$  به عنوان جریمه و  $\beta=0$  به عنوان پاداش در نظر گرفته می‌شود. بررسی مقدار انرژی پتانسیل شامل چهار قسمت به شرح زیر است.

۱. اگر یک سلول در همسایگی خود سلول یا سلولهای خاک سطحی داشته باشد که اشباع نشده‌اند، نیروی چسبندگی بین ذرات خاک و آب یک عامل جذب آب به این سلول میباشد. میزان تاثیر این عامل با پارامتر  $a_1$  سنجیده می‌شود. هر سلول سطح خاک یک متغیر دارد که با S نشان داده می‌شود. این متغیر برای مشخص کردن میزان رطوبت خاک به کار می‌رود. در ابتدا مقدار این متغیر صفر است. هر بار که یکی از سلولهای اطراف این سلول با آب پر میشود به این متغیر یک واحد افزوده می‌شود تا زمانی که به مقدار از پیش تعریف شده N برسد. N ثابت اشباع خاک است. محاسبه  $a_1$  به صورت زیر است:

$$a_1 = \sum_i \rho_i (1 - \frac{S_i}{N})$$

$\rho_1$  ضریب ثابتی است که میزان تاثیر این عامل را در برابر دو عامل خاصیت پیوستگی و جاذبه مشخص می‌کند. از فرمول فوق مشخص است

که هر چه خاک مرطوبتر می‌شود اثر این نیرو کمتر می‌شود و زمانی که خاک اشباع می‌شود اثر این نیرو صفر می‌شود.

۲. عامل دوم پیوستگی بین ذرات آب است. اگر آب به مکانی برود که در همسایگی آن سلولهای آب قرار داشته باشند، پاداش می‌گیرد. میزان تاثیر این عامل با  $a_2$  مشخص می‌شود.

$$a_2 = \rho_2 * waterCells$$

$\rho_2$  ضریب ثابتی است که میزان تاثیر این عامل را در برابر دو عامل دیگر مشخص می‌کند.

۳. عامل سوم نیروی جاذبه است. اگر آب به سمت پایین حرکت کند، جایزه می‌گیرد. میزان تاثیر این عامل با پارامتر  $a_3$  مشخص می‌شود.

۴. یک نکته دیگر نیز مطرح است. طبق تحقیقات انجام شده [۱] آب تمایل دارد در بخش کوچکی از کل حجم موجود خاک حرکت کند. در اکثر خاکها بیشتر از ۸۰ درصد آب تنها در ۲۰ درصد عرض خاک نفوذ می‌کند. برای در نظر گرفتن این نکته به حرکت آب به سلولی که سلول زیرین آن خالی است جایزه می‌دهیم. میزان تاثیر این عامل را نیز با  $a_4$  مشخص می‌کنیم.

در پایان مقدار  $a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$  را محاسبه می‌کنیم. اگر  $a > 0$  باشد عمل پاداش می‌گیرد. میزان پاداش نیز برابر  $a$  است. اگر  $a$  پارامتر پاداش می‌نامیم.

برای جلوگیری از ورود همزمان دو سلول آب به یک سلول خالی مرحله حرکت به سه زیرمرحله تقسیم می‌شود.

**مرحله ۱:** در این مرحله هر سلول آب جهت حرکت خود را به صورت زیر انتخاب می‌کند.

- اگر دقیقاً یکی از همسایه‌های دو طرف یا همسایه پایینی آن خالی باشد فلگ متناظر با آن همسایه ست می‌شود.

- اگر دو تا از همسایه‌ها خالی باشند، با توجه به مثال زیر یکی از آنها انتخاب و فلگ آن ست میشود. به عنوان مثال اگر امکان حرکت به دو سلول شرقی و غربی به ترتیب با احتمالات  $p_1$  و  $p_2$  باشند، به دلیل این که امکان حرکت به همسایه پایینی وجود ندارد، دو عمل فوق را با احتمالات  $p_1 + \frac{p_3}{2}$  و  $p_2 + \frac{p_3}{2}$  متناظر می‌کنیم. حال با توجه به این دو احتمال یکی از اعمال را انتخاب و فلگ مربوط به آن را ست می‌کنیم.

- اگر هر سه همسایه خالی باشد با توجه به بردار احتمالات اعمال یکی از عملها انتخاب و فلگ متناظر با آن را ست میشود.

- در غیر این صورت آب نمی‌تواند حرکت کند و فلگی ست نمی‌شود.

۱۰	۶۴
۵	۱۹

جدول ۱- اثر ثابت اشباع آب در میزان سم رسیده به آبهای زیرزمینی

فرایند نفوذ از خواص خاک نیز متاثر است. بعضی از انواع خاک مانند شن به راحتی آب را از خود عبور می‌دهد در حالیکه ماسه تمایل به جذب آب دارد. در شکل ۶ مقدار یکسانی آب به سه نوع خاک مختلف اعمال شده است. همان طور که مشخص است میزان نفوذ آب در این خاکها متفاوت است. در مدل پیشنهادی اگر احتمالات متناظر با حرکت آب به درستی انتخاب شود، این حقیقت به خوبی نشان داده می‌شود. به عنوان مثال برای شن باید احتمال اولیه حرکت آب به سمت پایین خیلی بیشتر از احتمال حرکت آب به طرفین باشد. زیرا خاصیت موئینگی در شن بسیار کم است. برعکس در ماسه خاصیت موئینگی زیاد است و باید احتمال حرکت به طرفین نیز قابل توجه باشد. شکل ۷ نتیجه شبیه‌سازی انجام شده بر روی یک نمونه خاک در مراحل مختلف شبیه سازی را نشان می‌دهد. در شکل ۷-الف احتمال اولیه حرکت به طرفین و پایین یکسان است اما در شکل ۷-ب احتمال اولیه حرکت به سمت پایین ۰/۹۹ و احتمال حرکت به هر یک از طرفین ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در شکل ۷-ب آب عمق بیشتری را طی کرده است. بنابراین اثر نیروی جاذبه از اثر خاصیت موئینگی بیشتر بوده است. در حالیکه در شکل ۷-الف حرکت افقی آب بیشتر از شکل ۷-ب است. برای خاکهایی که خاصیت موئینگی زیادی ندارند مانند شن تقریباً بیش از ۸۰ درصد آب تنها در ۲۰ درصد عرض خاک نفوذ می‌کند که نتایج آزمایشهای انجام گرفته موید این واقعیت می‌باشد.

سه عامل اصلی در نفوذ سموم شیمیایی در خاک موثر است: خواص خاک، خواص سموم و شرایط جوی و مکانی. در ادامه به اختصار هر یک از این عوامل را شرح می‌دهیم [۷].

#### خواص خاک:

- توانایی خاک در حرکت عمودی آب<sup>۱۴</sup>. مثلاً شن در مقابل ماسه خاک را سریعتر به پایین هدایت می‌کند. در مدل پیشنهادی این پارامتر با تعیین احتمالات حرکت آب در سه جهت مختلف مشخص می‌شود. به عنوان مثال برای شن احتمال احتمال حرکت عمودی آب بیشتر از احتمال حرکت افقی می‌باشد.
- ترکیب و ساختار خاک: میزان فشردگی خاک، تعداد و اندازه حفره‌های آن در نحوه حرکت آب در خاک موثر است. ترکیب و ساختار به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود.
- میزان رطوبت خاک: هر چه خاک مرطوبتر می‌شود تمایل کمتری به جذب آب دارد تا زمانی که به حالت اشباع برسد. در این حالت دیگر تمایل به جذب آب ندارد. این پارامتر از طریق تعیین ثابت اشباع برای خاک مشخص می‌شود.

عمل انتخاب شده توسط محیط بررسی شده و پاداش یا جریمه می‌شود و سپس بردار احتمالات اعمال بر طبق الگوریتم یادگیری که قبلاً در بخش ۲ به آن اشاره شد بروز می‌گردد.

**مرحله ۲:** در این مرحله هر سلول خالی از بین سلولهای آبی که قصد دارند به این سلول حرکت کنند یکی را انتخاب می‌کند. این انتخاب بر اساس میزان پاداش عمل انتخاب شده توسط اتوماتای یادگیر سلولهای آب همسایه انجام می‌گیرد. مراحل کار به صورت زیر است:

- اگر تنها یکی از همسایه‌ها قصد ورود به این سلول را داشته باشد فلگ متناظر با آن ست می‌شود و در غیر این صورت از بین سلولهای کاندید سلولی که عمل انتخابی آن پاداش بیشتری گرفته انتخاب شده و فلگ متناظر با آن ست می‌شود.
- اگر هیچ همسایه‌ای قصد حرکت به این سلول را ندارد فلگی ست نمی‌شود.

**مرحله ۳:** حرکت واقعی آب در این مرحله صورت می‌گیرد:

- اگر  $d_{i,j}=1$  و  $u_{i,j+1}=1$  آنگاه  $c(i,j)=c(i+1,j)$  و همه پارامترهای  $c(i,j)$  صفر می‌شوند.
- اگر  $l_{i,j}=1$  و  $r_{i,j-1}=1$  آنگاه  $c(i,j)=c(i,j-1)$  و همه پارامترهای  $c(i,j)$  صفر می‌شوند.
- اگر  $l_{i,j+1}=1$  و  $r_{i,j}=1$  آنگاه  $c(i,j)=c(i,j+1)$  و همه پارامترهای  $c(i,j)$  صفر می‌شوند.
- در غیر این صورت هیچ سلول آبی به این سلول وارد نمی‌شود.

## ۴- ارزیابی مدل پیشنهادی

شبیه‌سازی نفوذ سموم شیمیایی با استفاده از مدل پیشنهادی بر روی نمونه‌های مختلف خاک انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای بسترهایی با ساختارهای متفاوت و نیز انواع مختلف سم موجود در خاک، مقدار سم رسیده به آبهای زیرزمینی با واقعیت تطابق دارد. به عنوان مثال هر چه قابلیت حل سم در آب بیشتر باشد، احتمال حل شدن آن در آب و در نتیجه رسیدن آن به آبهای زیرزمینی بیشتر است. در مدل پیشنهادی این امر با در نظر گرفتن یک ثابت اشباع بزرگ برای آب حاصل می‌شود. در جدول ۱ به ازاء مقادیر مختلف برای ثابت اشباع آب، میزان سمی که بعد از ۱۰۰ مرحله تکرار اتوماتای یادگیر سلولی بستر را ترک می‌کند نشان داده شده است. همان طور که مشخص است هرچه ثابت اشباع آب بزرگتر باشد مقدار سم بیشتری را در خود حل می‌کند.

ثابت اشباع آب (SC)	میزان سم
۲۰	۸۶

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه سازی اثرات سموم در خاک پیشنهاد گردید. نشان داده شد که شبیه سازی فرایند نفوذ سموم در خاک با استفاده از این مدل به واقعیت نزدیکتر میباشد.

## مراجع

- [۱] Bandini, S. and Pavesi, G., "Simulation of Pesticide Percolation in the Soil Based on Cellular Automata", TTN/CAPP project, ۲۰۰۲.  
[۲] "Water Movement in Soils", [soilphysics.okstate.edu/software/water/infil.html](http://soilphysics.okstate.edu/software/water/infil.html), access at ۸۳/۴/۲۴.  
[۳] Watson, J. Hardy, L. Cordell, T. Cordell, S. Minch, E. and C. Pachek, C., "How Water Moves Through Soil", Cooperative Extension, College of Agriculture, University of Arizona, September ۱۹۹۵.  
[۴] Anderson, A. and Gustafson, P., "Water Movement and Soil Treatment", [www.onsiteconsortium.org/files/Video\\_Outline.pdf](http://www.onsiteconsortium.org/files/Video_Outline.pdf), ۱۸ October ۲۰۰۳.  
[۵] "Lecture Notes --Soil Water Part ۲", [www.soils.umn.edu/academics/classes/soil۲۱۲۵/doc/lec۲bwm.htm](http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil۲۱۲۵/doc/lec۲bwm.htm).  
[۶] Bowman, B. T. and Reynolds, W. D., "FAQ- Water Flow in Soils", [res۲.agr.gc.ca/london/faq/water-leau\\_e.htm](http://res۲.agr.gc.ca/london/faq/water-leau_e.htm).  
[۷] Buttler, T., Martinkovic, W. and Nesheim, O. N., "Factors Influencing Pesticide Movement to Ground Water", University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences (UF/IFAS), April ۱۹۹۸.  
[۸] "Movement of Pesticides in the Environment", A Pesticide Information Project of Cooperative Extension Offices of Cornell University, Oregon State University, [extoxnet.orst.edu/tibs/movement.htm](http://extoxnet.orst.edu/tibs/movement.htm), access at ۸۳/۴/۲۴.  
[۹] Wolfram, S. Cellular Automata and Complexity, Perseus Books Group, ۱۹۹۴.  
[۱۰] Meybodi, M. R., Beigy, H. and Taherkhani, M. "Cellular Learning Automata and Its Applications", Journal of Science and Technology, University of Sharif, No. ۲۵, pp.۵۴-۷۷, Autumn/Winter ۲۰۰۳-۲۰۰۴.

• مواد آلی در خاک: بعضی از مواد آلی با نوع خاصی از سموم به شدت ترکیب شده و مواد جدید حاصل قابلیت حل خیلی کمی در آب دارند.

## خواص سم:

- قابلیت حل: بعضی از سموم راحت تر از بقیه در آب حل می شوند. بنابراین با احتمال بیشتری به آبهای زیرزمینی می رسند. این عامل نیز با در نظر گرفتن ثابتهای اشباع برای آب و خاک انجام شده است.
- فراریت: بعضی از انواع سموم به محض تماس با هوا سریعاً تبخیر می شوند. اگر چه خود این سموم به نحو دیگری موجب آلودگی محیط می شوند ولی در این جا مورد بحث قرار نمی گیرند.
- طول عمر سم: سموم به تدریج تجزیه می شوند. سموم در اثر تجزیه به مواد بی ضرر مانند دی اکسید کربن تبدیل می شوند.

## شرایط جوی و مکانی:

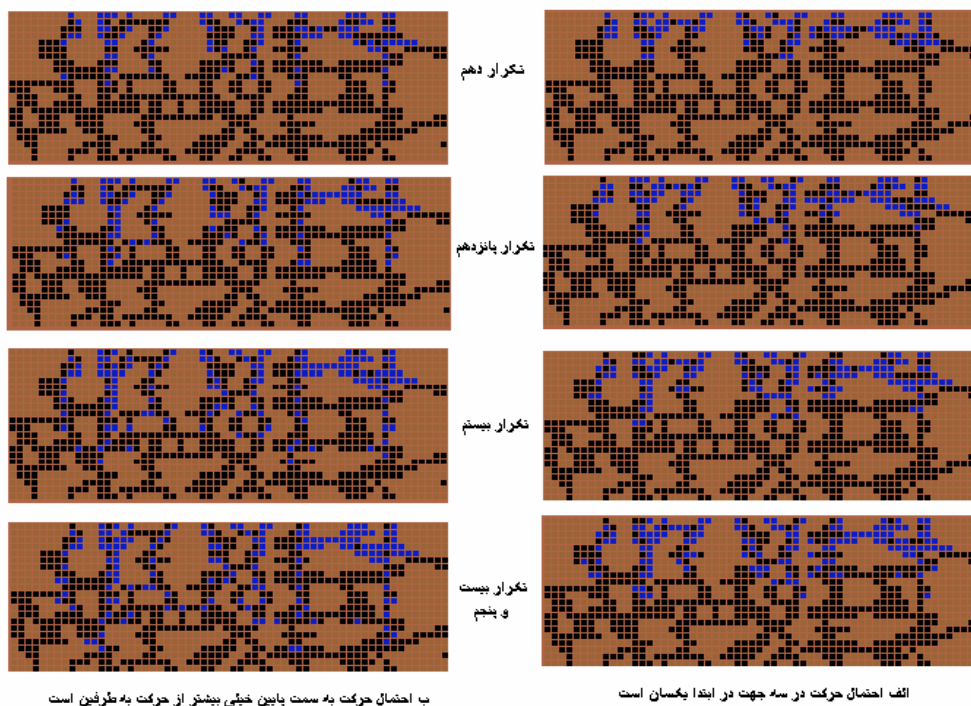
- شرایط جوی مانند میزان و شدت بارندگی بر میزان سموم رسیده به آبهای زیرزمینی موثر است. در مدل ارائه شده باران خفیف، باران شدید و سیل را شبیه سازی و اثر هر یک را بررسی کرده ایم.
- شرایط مکانی نیز مانند عمق آبهای زیرزمینی نیز عامل موثر دیگری است. عمق خاک نیز با تعیین تعداد سطرهای شبکه سلولی در مدل پیشنهادی مشخص میشود.

در مدل ارائه شده خواص سموم به ویژه طول عمر آنها مورد نظر قرار نگرفته است. سموم به تدریج تجزیه می شوند. بطور مثال اگر خاک نمناک و گرم باشد باعث می شود میکروبهای موجود در آن از ذرات سم به عنوان غذا استفاده کنند و آنرا به مواد بی ضرر تبدیل کنند. این امر یکی از مواردی است که می تواند در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شود. یکی دیگر از مواردی که در نظر گرفته نشده است میزان مواد آلی خاک است. این مواد تمایل دارند با سم ترکیب شوند و در نتیجه با احتمال کمتری در آب حل می شوند. بنابراین هر چه میزان مواد آلی خاکی بیشتر باشد خطر کمتری دارد. این امر را نیز می توان با تغییر قاعده واکنش در نظر گرفت. عامل دیگری که می توان در نظر گرفت نقش ارگانه های زنده موجود در خاک است. به عنوان مثال ریشه گیاهان تمایل دارند آب را در اطراف خود نگه دارند. همچنین حشرات و دیگر موجودات زنده دورن خاک نقش موثری در تعیین ساختار خاک دارند [ ۸].



شکل ۶- میزان نفوذ آب در خاکهای مختلف





شکل ۷- میزان نفوذ آب در خاک

Proceedings of the Second Iranian Conference on Machine Vision, Image Processing and Applications, KNU University, Tehran, Iran, pp. ۲۶۱-۲۷۰, ۲۰۰۳.

[۱۸] Rastegar, R. and Meybodi, M. R. "A New Evolutionary Computing Model based on Cellular Learning Automata", *Proceedings of ۲۰۰۴ IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS)*, pp. ۴۳۳-۴۳۸, Singapore ۱-۳ Dec. ۲۰۰۴

[۱۹] Rastegar, R., Hariri, A. and Meybodi, M. R. "A Fuzzy Clustering Algorithm Using Cellular Learning Automata based Evolutionary Algorithm", *Proceedings of Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'۰۴)*, pp. ۳۱۰-۳۱۴, Japan, Kitakyushu, Dec. ۲۰۰۴.

[۲۰] Rastegar, R., Rahmati, M. and Meybodi, M. R. "A CLA-EC based Clustering Algorithm", to appear in *IEEE Conference in Advances Artificial Intelligence: Theory and Application (AISTA ۲۰۰۴)*, Luxemburg, October ۲۰۰۴.

[۲۱] Saheb Zamani, M., Mehdipour, F. and Meybodi, M. R. "Implementation of Cellular Learning Automata on Reconfigurable Computing Systems", *IEEE CCGEI ۲۰۰۳ Conference*, Montreal, Canada, May ۲۰۰۳.

[۲۲] Kharazmi, M. R. and Meybodi, M. R. "Application of Cellular Learning Automata to Image Segmentation", *Proceedings of Tenth Conference on Electrical Engineering (۱۰<sup>th</sup> ICEE)*, University of Tabriz, Vol ۱, pp. ۲۹۸-۳۰۶, May ۲۰۰۲.

[۱۱] Beigy, H. and Meybodi, M. R. "A Mathematical Framework for Cellular Learning Automata", *Advances in Complex Systems*, Vol. ۷, Nos. ۳-۴, pp. ۲۹۵-۳۲۰, September/December ۲۰۰۴.

[۱۲] Beigy, H. and Meybodi, M. R. "A Self-Organizing Channel Assignment Algorithm: A Cellular Learning Automata Approach", Vol. ۲۶۹۰ of *Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Science*, pp. ۱۱۹-۱۲۶, Springer-Verlag, ۲۰۰۳.

[۱۳] Meybodi, M. R. and Kharazmi, M. R. "Application of Cellular Learning Automata to Image Processing", *Journal of Amirkabir*, Vol. ۱۴, No. ۵۶A, pp. ۱۱۰۱-۱۱۲۶, ۲۰۰۴.

[۱۴] Meybodi, M. R. and Khojaste, M. R. "Application of Cellular Learning Automata in Modeling of Commerce Networks", in *Proceedings of ۶th Annual International Computer Society of Iran Computer Conference CSICC ۲۰۰۱*, Isfahan, Iran, pp. ۲۸۴-۲۹۵, ۲۰۰۱.

[۱۵] Meybodi, M. R. and Mehdipour, F. "VLSI Placement Using Cellular Learning Automata", *Journal of Modares, University of Tarbiat Modares*, Vol. ۱۶, pp. ۸۱-۹۵, summer ۲۰۰۴.

[۱۶] Meybodi, M. R. and Taherkhani, M. "Application of Cellular Learning Automata to Modeling of Rumor Diffusion", in *Proceedings of ۹th Conference on Electrical Engineering, Power and Water institute of Technology*, Tehran, Iran, pp. ۱۰۲-۱۱۰, May ۲۰۰۱.

[۱۷] Meybodi, M. R. and Kharazmi, M. R. "Image Restoration Using Cellular Learning Automata", in

- [۲۳] Kharazmi, M. R. and Meybodi, M. R. “An Algorithm Based on Cellular Learning Automata for Image Restoration”, Proceedings of The First Iranian Conference on Machine Vision & Image Processing, University of Birjand, pp. ۲۴۴–۲۵۴, March ۲۰۰۱.
- [۲۴] Marchini, F. and Meybodi, M. R. “Application of Cellular Learning Automata to Image Processing: Finding Skeleton” ,Proceedings of The Third Conference on Machine Vision, Image Processing and Applications (MVIP ۲۰۰۵) University of Tehran, Tehran, Iran, pp. ۲۷۱–۲۸۰, Feb. ۲۰۰۵.
- [۲۵] Najim, K. and Poznyak, A. S., editors, Learning automata: theory and application, Tarrytown, New York: Elsevier Science Publishing Ltd., ۱۹۹۴.
- [۲۶] Mars, P., Chen, J. R. and Nambiar, R. Learning algorithms theory and applications in signal processing, control and communications, CRC Press, ۱۹۹۶.
- [۲۷] Narendra, K. S. and Thathachar, M. A. L. Learning Automata: An Introduction, Prentice Hall, ۱۹۸۹.
- [۲۸] Lakshmivarahan, S. Learning algorithms: Theory and Applications, New York: Springer-Verlag, ۱۹۸۱.
- [۲۹] Thathachar, M. A. L. and Sastry, P. S. “Varieties of Learning Automata: An Overview”, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. ۲۲, No. ۶, pp. ۷۱۱–۷۲۲, ۲۰۰۲.

---

<sup>۱</sup> Bandini

<sup>۲</sup> Pavesi

<sup>۳</sup> Cellular Automata

<sup>۴</sup> Learning Automata

<sup>۵</sup> Finite State Machine

<sup>۶</sup> Variable structure

<sup>۷</sup> Linear reward penalty

<sup>۸</sup> Linear reward epsilon penalty

<sup>۹</sup> Linear reward inaction

<sup>۱۰</sup> Cellular Learning Automata

<sup>۱۱</sup> Bandini

<sup>۱۲</sup> Pavesi

<sup>۱۳</sup> Capillary force

<sup>۱۴</sup> Adhesion

<sup>۱۵</sup> Cohesion

<sup>۱۶</sup> Permeability